

---

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1234R567 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Měření parametrů 3f transformátoru**

**Three phase transformer measurement**

**Bakalářská práce**

Autor: **Josef Petřvalský**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

**V Liberci 19. 5. 2011**



---

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis



## PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl velice poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D a konzultantu Ing. Jiřímu Kubínovi, Ph.D za pomoc a podporu při tvorbě, zkoušení, návrhu a realizaci bakalářské práce.

---

## Anotace

Cílem bakalářské práce je navrhnout a vytvořit program (prostředí), které by provádělo veškeré měření po udání základních konstrukčních parametrů (jmenovité napětí, proud,...) a dimenzovanosti transformátoru (jmenovité napětí, proud...) a výsledek zobrazit v grafickém uživatelském rozhraní na počítači.

Bakalářská práce se zaměřuje na základní měření jmenovitých hodnot tj. měření naprázdno, měření nakrátko a měření se zátěží, kde na základě získaných hodnot lze určit všechny potřebné vlastnosti transformátoru. Všechna měření musí splňovat podmínky udávané normou. Tato měření vychází z norem ČSN 60075 a ČSN 3351086, kde jsou jasné specifikována.

Jednotlivá měření jsou prováděna automaticky s minimálním zásahem uživatele. Zajištění potřebných hardwarových zásahů (přimknutí stykače, změna rozsahu, změna zkoušky...) je prováděna programem. Rovněž veškeré parametry měřeného obvodu (napětí, proud) jsou snímány multifunkční měřicí kartou připojenou k počítači a pomocí programu vyhodnocovány, ukládány a vizuálně prezentovány.

Počítačový program je navržen jako automatický s minimálními požadavky na schopnosti zásahu obsluhy.



---

## Annotation

The aim of this work is to design and create a program (environment), which carried out all measurements after entering the basic design parameters (nominal voltage, current, etc) and transformer settings (rated voltage, current, etc.) and viewed in a graphical user interface on the computer.

This thesis focuses on the basic measurement of the nominal value: load measurement, measurement of short and load measurements, where they obtained values can determine all the necessary properties of the transformer.

All measurements must meet the conditions indicated by the standard. This measurement is based on ISO standards ČSN 60075 and 3351086, which are clearly specified. Individual measurements are carried out automatically with minimal user intervention. Providing the necessary hardware interference (contactors adherence, change scale, change the test, etc.) is implementing the program. Similarly, all parameters measured circuit (voltage, current) is sensed by measuring multi-card attached to your computer using the program evaluated, stored and presented visually. A computer program is designed as an automatic with minimum operator intervention capabilities.

## Seznam použitých značek a symbolů

|                             |           |  |
|-----------------------------|-----------|--|
| $B$                         | $T$       | magnetická indukce   |
| $B_{1p0}, B_{2p0}, B_{3p0}$ | $T$       | magnetická indukce naprázdno   |
| $B_{1pk}, B_{2pk}, B_{3pk}$ | $T$       | magnetická indukce nakrátko  |
| $\cos \varphi$              | -         | účinník  |
| $\cos \varphi_0$            | -         | účinník naprázdno  |
| $\cos \varphi_k$            | -         | účinník nakrátko   |
| $f$                         | $Hz$      | frekvence  |
| $f_0$                       | $Hz$      | kmitočet naprázdno   |
| $f_k$                       | $Hz$      | kmitočet nakrátko  |
| $f_n$                       | $Hz$      | jmenovitý kmitočet transformátoru  |
| $H_{1pk}, H_{2pk}, H_{3pk}$ | $Am^{-1}$ | intenzita magnetického pole primárních vinutí                            |
| $H_{xy}$                    | -         | prvky $H_{ij}$ -matice   |
| $i_1$                       | $A$       | okamžitá hodnota primárního proudu                                       |
| $i_{1k}$                    | $\%$      | poměr proudů nakrátko  |
| $i_{1p0}, i_{2p0}, i_{3p0}$ | $A$       | okamžitá hodnota primárního proudu<br>naprázdno na jednotlivém vinutí    |
| $i_{1pk}, i_{2pk}, i_{3pk}$ | $A$       | okamžitá hodnota primárního proudu<br>nakrátko na jednotlivém vinutí     |
| $i_{1sk}, i_{2sk}, i_{3sk}$ | $A$       | okamžitá hodnota sekundárního proudu<br>naprázdno na jednotlivém vinutí  |
| $i_2$                       | $A$       | okamžitá hodnota sekundárního proudu                                     |
| $i_{2,k}$                   | $A$       | sekundární proud nakrátko  |
| $i_\mu$                     | $A$       | magnetizační „tokotvorný“ proud  |
| $i_{\mu 0}$                 | $A$       | prvotní magnetizační proud   |
| $I_1, I_2, I_3$             | $A$       | efektivní hodnota vstupního proudu                                       |
| $I_{1p0}, I_{2p0}, I_{3p0}$ | $A$       | efektivní hodnota primárního proudu<br>naprázdno v jednotlivých vinutích |
| $I_{1pk}, I_{2pk}, I_{3pk}$ | $A$       | efektivní hodnota primárního proudu<br>nakrátko v jednotlivých vinutích  |



---

|                             |      |   |
|-----------------------------|------|---|
| $I_{1sk}, I_{2sk}, I_{3sk}$ | A    | efektivní hodnota primárního proudu<br>nakrátko v jednotlivých vinutích |
| $I_{p0}$                    | A    | efektivní hodnota primárního proudu<br>naprázdno                        |
| $I'_{p0}$                   | A    | efektivní hodnota primárního proudu –<br>naprázdno při korekci          |
| $I_{pk}$                    | A    | efektivní hodnota primárního proudu<br>nakrátko                         |
| $I_{sk}$                    | A    | efektivní hodnota sekundárního proudu<br>nakrátko                       |
| $I_{Fe}$                    | A    | magnetizační proud  |
| $I_n$                       | A    | jmenovitý proud   |
| $k$                         | -    | konstanta   |
| $k$                         | -    | koeficient vazby mezi vinutími  |
| $K$                         | -    | koeficient teplotního převodu   |
| $K_{u,21,0}$                | -    | napět'ový přenos naprázdno  |
| $K_{u,12,0}$                | -    | napět'ový přenos naprázdno  |
| $K_{i,21,k}$                | -    | proudový přenos nakrátko  |
| $K_{i,12,k}$                | -    | proudový přenos nakrátko  |
| $l$                         | m    | střední délka siločáry  |
| $L$                         | H    | indukčnost  |
| $L_1$                       | H    | indukčnost primárního vinutí  |
| $L_2$                       | H    | indukčnost sekundárního vinutí  |
| $L_{VST,k}$                 | H    | vstupní indukčnost  |
| $M$                         | H    | vzájemná indukčnost   |
| $M_1$                       | H    | indukčnost na vstupu  |
| $M_2$                       | H    | indukčnost na výstupu   |
| $N$                         | zav. | počet závitů vinutí   |
| $N_1$                       | zav. | počet závitů na primárním vinutí  |
| $N_2$                       | zav. | počet závitů na sekundárním vinutí                                      |
| $N_3$                       | zav. | počet závitů na terciárním vinutí                                       |
| $p_1$                       | -    | poměrové ztráty hysterezí   |

---

---

|                             |          |  |
|-----------------------------|----------|--|
| $p_2$                       | -        | poměrové ztráty vířivými proudy                                      |
| $P$                         | W        | činný výkon  |
| $P_{ak}$                    | W        | Rozdíl ztrát způsobené oteplením                                     |
| $P_{a\theta}$               | W        | přídavné kompenzační ztráty  |
| $P_0$                       | W        | činný výkon naprázdno  |
| $P_0'$                      | W        | činný výkon naprázdno po korekci                                     |
| $P_{1p0}, P_{2p0}, P_{3p0}$ | W        | primární činný výkon naprázdno na primárních vinutích                |
| $P_k$                       | W        | činný výkon nakrátko   |
| $P_k'$                      | W        | činný výkon nakrátko po korekci                                      |
| $P_{1pk}, P_{2pk}, P_{3pk}$ | W        | činný výkon nakrátko na primárních vinutích                          |
| $P_{k\theta}$               | W        | přepočet ztrát nakrátko  |
| $Q$                         | Var      | jalový výkon   |
| $Q_0$                       | Var      | jalový výkon naprázdno   |
| $Q_k$                       | Var      | jalový výkon nakrátko  |
| $R_{Z1}, R_{Z2}, R_{Z3}$    | $\Omega$ | odpor zátěže   |
| $R_{Cu}$                    | $\Omega$ | odpor vinutí nakrátko  |
| $R_{Zkrat}$                 | $\Omega$ | odpor zkratovacího vodiče  |
| $S$                         | $m^2$    | průřez jádra transformátoru  |
| $S_0$                       | VA       | zdánlivý výkon transformátoru naprázdno                              |
| $S_k$                       | VA       | zdánlivý výkon transformátoru nakrátko                               |
| $S_n$                       | VA       | jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru                              |
| $T$                         | s        | perioda vzorkovaného signálu   |
| $u_1$                       | V        | okamžitá hodnota primárního napětí                                   |
| $u_{1k}$                    | %        | poměr napětí nakrátko  |
| $u_{1p0}, u_{2p0}, u_{3p0}$ | V        | okamžitá hodnota primární napětí naprázdno na jednotlivém vinutí     |
| $u_{1s0}, u_{2s0}, u_{3s0}$ | V        | okamžitá hodnota sekundárního napětí naprázdno na jednotlivém vinutí |
| $u_2$                       | V        | okamžitá hodnota sekundárního napětí                                 |
| $u_2'$                      | -        | derivace napětí  |

---



---

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| $u_{s0}$                    | V | sekundární napětí naprázdno   |
| $u_{ef}$                    | V | efektivní hodnota napětí  |
| $u_i$                       | V | indukované napětí   |
| $u_{i1}$                    | V | indukované napětí na zdroji na primární straně                        |
| $u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}$    | V | indukované napětí primárních vinutí                                   |
| $u_{i2}$                    | V | napětí na zdroji na primární straně                                   |
| $u_{1sk}, u_{2sk}, u_{3sk}$ | V | okamžitá hodnota sekundárního napětí nakrátko na jednotlivém vinutí   |
| $u_{k\vartheta}$            | V | činná složka napětí nakrátko  |
| $u_{L1}$                    | V | napětí na primárním vinutí  |
| $u_{L2}$                    | V | napětí na sekundárním vinutí  |
| $u_m$                       | V | elektromotorické napětí   |
| $u_{r\vartheta}$            | V | činná složka napětí nakrátko při teplotě $\vartheta$                  |
| $u_{x\vartheta}$            | V | induktivní složka napětí nakrátko při teplotě                         |
| $u_r$                       | V | činná složka napětí nakrátko při kmitočtu $f_k$                       |
| $u_x$                       | V | induktivní složka napětí nakrátko při kmitočtu $f_k$                  |
| $U_1$                       | V | efektivní hodnota napětí primárního vinutí                            |
| $U_{1p0}, U_{2p0}, U_{3p0}$ | V | efektivní hodnota primárního napětí na jednotlivém vinutí naprázdno   |
| $U_{1s0}, U_{2s0}, U_{3s0}$ | V | efektivní hodnota sekundárního napětí na jednotlivém vinutí naprázdno |
| $U_2$                       | V | efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí                          |
| $U_n$                       | V | jmenovité napětí  |
| $U_n'$                      | V | jmenovité napětí po korekci   |
| $U_{p0}$                    | V | efektivní hodnota primárního napětí naprázdno                         |
| $U_{pk}$                    | V | efektivní hodnota primárního napětí nakrátko                          |
| $U_{s0}$                    | V | efektivní hodnota sekundárního napětí naprázdno                       |

|                      |          |   |
|----------------------|----------|---|
| $U_{sk}$             | V        | efektivní hodnota sekundárního napětí<br>nakrátko |
| $X_{Ip0}$            | $\Omega$ | sekundární reaktance nakrátko                     |
| $X_k$                | $\Omega$ | reaktance nakrátko                                |
| $Y$                  | S        | obecná admitance                                  |
| $Y_{12,0}$           | S        | přenosová admitance naprázdno                     |
| $Y_{21,0}$           | S        | přenosová admitance naprázdno                     |
| $Y_{VST,0}$          | S        | vstupní admitance při výstupu naprázdno           |
| $Y_{VST,K}$          | S        | vstupní admitance při výstupu nakrátko            |
| $Y_{V\check{Y}ST,0}$ | S        | výstupní admitance při vstupu naprázdno           |
| $Y_{V\check{Y}ST,K}$ | S        | výstupní admitance při vstupu nakrátko            |
| $Z$                  | $\Omega$ | obecná impedance                                  |
| $Z_k$                | $\Omega$ | impedance nakrátko                                |
| $Z_{sk}$             | $\Omega$ | sekundární impedance nakrátko                     |
| $Z_{12,K}$           | $\Omega$ | přenosová impedance naprázdno                     |
| $Z_{21,0}$           | $\Omega$ | přenosová impedance naprázdno                     |
| $Z_{VST,0}$          | $\Omega$ | vstupní impedance při výstupu naprázdno           |
| $Z_{VST,K}$          | $\Omega$ | vstupní impedance při výstupu nakrátko            |
| $Z_{V\check{Y}ST,0}$ | $\Omega$ | výstupní impedance při vstupu naprázdno           |
| $Z_{V\check{Y}ST,K}$ | $\Omega$ | výstupní impedance při vstupu nakrátko            |
| $Z_{xy}$             | -        | prvky $Z_{ij}$ -matice                            |
| $\delta_{iHTM200M}$  | A        | chyba proudových sond primárního vinutí           |
| $\delta_{iHTM100s}$  | A        | chyba proudových sond sekundárního vinutí         |
| $\delta_i$           | A        | chyba metody měření proudu                        |
| $\partial x_i$       | -        | parametr parciální derivace                       |
| $\partial f$         | -        | derivovaná funkce                                 |
| $\Delta P_{Fe}$      | W        | ztráty v magnetickém obvodu                       |
| $\Delta P_{j0}$      | W        | ztráty ve vinutí                                  |
| $\Delta u_1$         | V        | úbytek napětí na primární indukčnosti             |
| $\Delta u_2$         | V        | úbytek napětí na výstupní indukčnosti             |
| $\delta U_{ef}$      | V        | chyba efektivního napětí                          |
| $\Delta y$           | jednotka | obecná chyba nepřímého měření                     |



---

| $\Delta x_i$                         | jednotka           | chyba nepřímé veličiny                    |
|--------------------------------------|--------------------|---|
| $\vartheta$                          | $^{\circ}\text{C}$ | teplota vinutí                            |
| $\varphi$                            | $^{\circ}$         | fázový posun                              |
| $\varphi_0$                          | $^{\circ}$         | fázový posun naprázdno                    |
| $\varphi_k$                          | $^{\circ}$         | fázový posun nakrátko                     |
| $\Phi$                               | Wb                 | magnetický indukční tok                   |
| $\Phi_{1p0}, \Phi_{2p0}, \Phi_{3p0}$ | Wb                 | magnetický indukční tok primárních vinutí |
| $\Phi_0$                             | Wb                 | zbytkový magnetický indukční tok          |
| $\chi_{\sigma 1}$                    | $\Omega$           | primární rozptylová reaktance             |
| $\chi_{\sigma 2}$                    | $\Omega$           | sekundární rozptylová reaktance           |
| $\theta$                             | $^{\circ}\text{C}$ | referenční teplota pro měření nakrátko    |



---

# Obsah

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>PROHLÁŠENÍ</b>   | <b>2</b>         |
| <b>ANOTACE</b>  | <b>4</b>         |
| <b>ANNOTATION</b>   | <b>5</b>         |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ</b>                                      | <b>6</b>         |
| <br>  |                  |
| <b><u>1 ÚVOD</u></b>  | <b><u>14</u></b> |
| <br>  |                  |
| <b><u>2 TRANSFORMÁTOR</u></b>   | <b><u>16</u></b> |
| <br>  |                  |
| <b>2.1 IDEÁLNÍ TRANSFORMÁTOR, ROZBOR JAKO PASIVNÍ ČTYŘPÓL</b>                 | <b>16</b>        |
| <b>2.2 ZÁKLADNÍ MODEL TRANSFORMÁTORU VE TVARU IMPEDANČNÍ Z-MATICE</b>         | <b>19</b>        |
| <b>2.3 MODEL TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ VE TVARU HYBRIDNÍ HU-MATICE</b>            | <b>19</b>        |
| <b>2.4 MODEL TRANSFORMÁTORU PROUDU VE TVARU HYBRIDNÍ H<sub>I</sub>-MATICE</b> | <b>21</b>        |
| <br>  |                  |
| <b><u>3 ZKOUŠKY</u></b>   | <b><u>23</u></b> |
| <br>  |                  |
| <b>3.1 NORMY</b>  | <b>23</b>        |
| <b>3.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO</b>  | <b>24</b>        |
| 3.2.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ   | 24               |
| 3.2.2 POUŽITÉ VÝPOČTY   | 25               |
| 3.2.3 KOREKCE   | 30               |
| <b>3.3 ZKOUŠKA NAKRÁTKO</b>   | <b>32</b>        |
| 3.3.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ   | 32               |
| 3.3.2 POUŽITÉ VZORCE  | 33               |
| 3.3.3 KOREKCE   | 35               |
| <b>3.4 ZKOUŠKA ZATĚŽOVACÍ</b>   | <b>38</b>        |
| 3.4.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ   | 38               |
| <b>3.5 VZORCE PRO PARAMETRY TRANSFORMÁTORU</b>                                | <b>39</b>        |
| <b>3.6 NEJISTOTY MĚŘENÍ</b>   | <b>40</b>        |
| 3.6.1 MĚŘÍCÍ KARTA  | 40               |
| 3.6.2 PROUDOVÉ SONDY  | 41               |
| 3.6.3 VÝPOČET NEJISTOT  | 41               |



---

|          |                                  |                  |
|----------|----------------------------------|------------------|
| <b>4</b> | <b><u>HARDWARE</u></b>           | <b><u>43</u></b> |
| 4.1      | ROZHRANÍ A KOMUNIKACE            | 43               |
| 4.2      | MĚŘÍCÍ KARTA NIDAQ               | 43               |
| 4.3      | BLOKOVÉ SCHÉMA, USPOŘÁDÁNÍ       | 45               |
| <b>5</b> | <b><u>SOFTWARE</u></b>           | <b><u>48</u></b> |
| 5.1      | MATLAB                           | 48               |
| 5.2      | GUIDE                            | 49               |
| 5.3      | PROGRAMOVÁ VÝBAVA                | 51               |
| <b>6</b> | <b><u>OBSLUHA PRACOVISTĚ</u></b> | <b><u>55</u></b> |
| 6.1      | KONTROLA ZAŘÍZENÍ                | 55               |
| 6.2      | VLASTNÍ MĚŘENÍ                   | 56               |
| 6.2.1    | STRUKTURA MĚŘÍCÍHO ROZHRANÍ      | 56               |
| 6.3      | ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ                | 58               |
| 6.4      | MĚŘENÍ NAPRÁZDNO                 | 58               |
| 6.5      | MĚŘENÍ NAKRÁTKO                  | 62               |
| <b>7</b> | <b><u>ZÁVĚR</u></b>              | <b><u>66</u></b> |
|          | SEZNAM OBRÁZKŮ                   | 67               |
|          | SEZNAM TABULEK                   | 68               |
|          | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY        | 69               |

---

# 1 ÚVOD

Transformátory a transformátorky patří k elektronice k nejužívanějším strojům vůbec. Využitím těchto elektromagnetických netočivých strojů je velice široké přes rozsahy výkonových parametrů tak, i dle jejich funkce (oddělovací, snižující, zvyšující, regulační, bezpečnostní, signálové...). Nalezneme je jak v obvodech malého napětí, tak ve vysokonapěťových aplikacích. Nepostradatelnou úlohu mají především v distribuci elektrické energie.

Ekonomické tlaky zvyšují neustále nároky na transformátory a to nejen na jejich pořizovací, ale také na provozní náklady. Vývoj nových materiálů, technologií a sofistikovanějších konstrukčních a optimalizačních postupů, podstatně zlepšily parametry transformátorů v posledních dekádách.

Pro správnou funkci transformátoru je nutné dodržovat příslušné výrobní postupy a kontrolovat jejich výkonové parametry pomocí kontrolních měření – zkoušek. Tato měření jsou přesně definována normami ČSN.

Měření na transformátorech tvoří v elektrotechnice vlastní disciplínu, která se zaměřuje na všechny typy transformátorů (podle velikosti a dle výkonnostních parametrů, dále pak podle konstrukce, počtu fází atd.), popisující druhy a postupy měření pro tyto transformátory apod.

Samostatné měření na transformátorech znamená několik po sobě jdoucích měření. Jednotlivá měření se liší dle způsobu zapojení a velikostí měřených veličin (tj. proudu, napětí, oteplení, izolačních vlastností...). Komplexnost měření je značí, a proto důvod je zde namísto pro vytvoření automatizovaného měření.

Komerční automatizovaná pracoviště nebo speciální testery transformátorů jsou samozřejmě dostupné na trhu. Dostupné jsou například testery transformátorů a vinutých dílů do spínaných zdrojů [12], které jsou specializovány na měření při vyšších frekvencích. Měření probíhají při poměrně malém výkonu. Dalšími dostupnými přístroji jsou jednoduché provozní měřiče impedance [13], které poskytují jen elementární informaci o stavu transformátoru a jeho propojení. K dispozici jsou i komplexní měřicí pracoviště [14]. Mezi nejrozšířenější měřicí systémy v revizích vysokonapěťových aplikacích se užívají DTR (Digital Transformer Ratiometr), které zjišťují vlastnosti vinutí a izolace, výkon a některé dovedou spočítat saturační napětí. Obecně DTR patří k nejpřesnějším. Mezi

---

nízkonapěťové měřiče zahrnujeme převážně jednoruční přístroje: testery izolačních odporů transformátorů, testery převodového poměru transformátoru, aj. [15].

Tato práce prezentuje návrh a realizaci automatizovaného testovacího pracoviště transformátorků obsahujícího nezbytný hardware pro výkonové propojení transformátoru nn (do 20 kVA) a měření elektrických veličin. Pracoviště provádí základní provozní zkoušky. Přepět'ové, oteplovací a další speciální zkoušky nebyly součástí řešení. Ovládací rozhraní navrženým programem s uživatelským rozhraním. Obsluha měřicí stanice zadá štítkové údaje udané výrobcem transformátoru (jsou nezbytné pro některé výpočty a výkonová omezení při měření) před vlastním měřením, pak stačí připojit transformátor a zbytek testu se provádí automaticky. Zadané údaje a výsledky jsou přehledně archivovány.

Práce je rozdělena na tři základní celky: První část se zaměřuje na seznámení s problematikou okolo transformátorů a jejich kusovými zkouškami (zkoušky naprázdno, nakrátko a se zátěží), druhý celek říká, jak byl konstruován program jeho hlavní struktura s popisem jednotlivých užitých metod programování (smyčka událostí, apod.) a třetí závěrečný bod je věnován správné obsluze pracoviště a vyhodnocení měření.

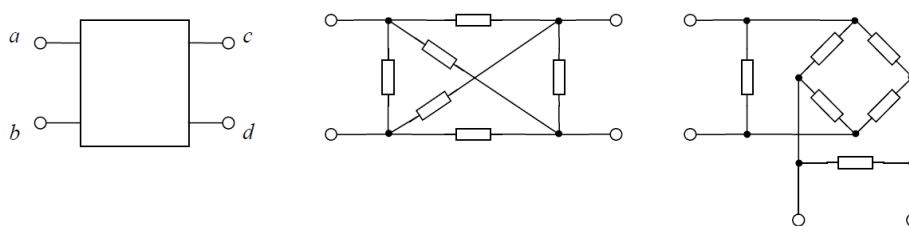
## 2 Transformátor

[1] Dle normy ČSN 345125 je transformátor definován jako netočivý elektromagnetický stroj, převádějící bez pohybu elektromagnetickou indukcí střídavé nebo přerušované proudy, přiváděné do jedné obvodu ve střídavé proudy nebo proudové impulsy odebírané z druhých obvodů. Tento přenos elektrické energie transformátorem je možný v obou směrech, ze zásady je transformátor používán v jednom směru energie. Z tohoto hlediska lze rozdělit transformátory:

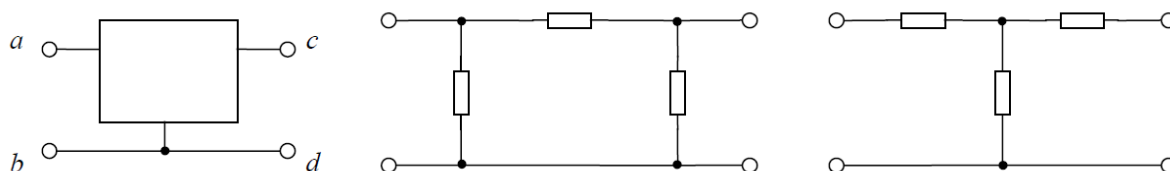
- a) zvyšovací
- b) snižovací
- c) s přenosem energie v obou směrech.

### 2.1 Ideální transformátor, rozbor jako pasivní čtyřpól

Pasivní čtyřpól v obecném tvaru má šest stupňů volnosti. To znamená, že jakkoliv složitý čtyřpól lze nahradit ekvivalentním čtyřpólem složeným šesti impedancí. Každá dvojice svorek ekvivalentního čtyřpólu je propojena jednou impedancí – šest impedancí a šest stupňů volnosti.



Obr. 1: Náhrada čtyřpólu šesti impedancemi (můstkový článek je ekvivalentní s křížovým článkem)



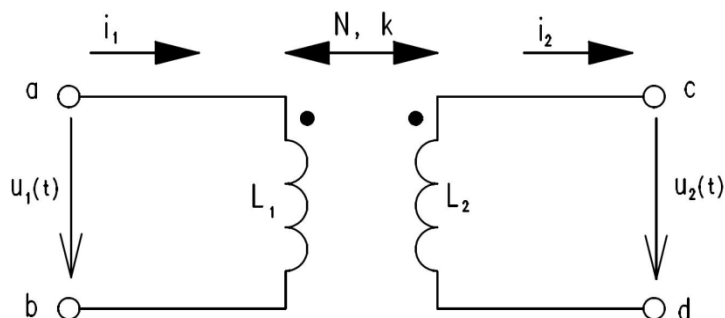
Obr. 2: Náhrada trojpólu  $\Pi$ -článkem obsahující tři impedance.  $\Pi$ -článek lze transfigurací *trojúhelník - hvězda* přetransformovat na  $T$ -článek.článkem)



[2] Ze tří stupňů volnosti přímo plyne, že vlastnosti čtyřpólu jsou plně definovány buď trojicí nezávislých přenosových parametrů (např.  $Z_{vst,0}$ ,  $Z_{vst,K}$ ,  $K_{U,21,0}$ ), nebo trojicí nezávislých obvodových parametrů. U transformátoru se obvykle jedná o trojici obvodových parametrů  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M$  nebo  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $k$ , protože čtveřice  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M$ ,  $k$  je na sobě závislá podle známého vztahu

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (1)$$

a proto je libovolný jeden ze čtyř parametrů nadbytečný.



Obr. 3: Transformátor jako dvojbran

Každý přenosový čtyřpól lze popsat maticí o dimenzi 2x2. Kromě toho známé **Z**-matice a **Y**-matice neexistují teoreticky další čtyři hybridní **H**-matice:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}: \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_k: \begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{k11} & h_{k12} \\ h_{k21} & h_{k22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ i_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}_i: \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{i11} & h_{i12} \\ h_{i21} & h_{i22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, & \mathbf{H}_U: \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{U11} & h_{U12} \\ h_{U21} & h_{U22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}_N: \begin{bmatrix} u_2 \\ i_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{N11} & h_{N12} \\ h_{N21} & h_{N22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix}, & \mathbf{Y}: \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(2, 3, 4, 5, 6, 7)

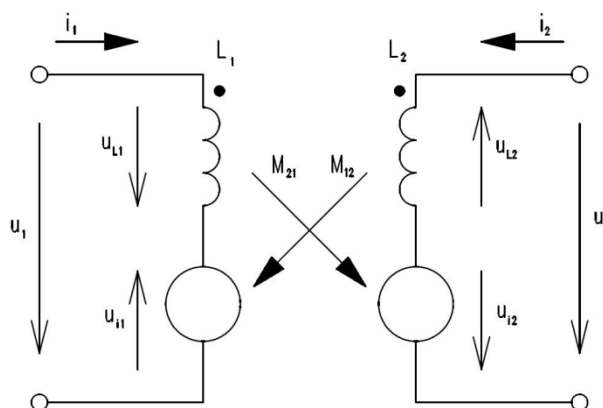
Kde nejdůležitější matice jsou **H<sub>U</sub>** a **H<sub>i</sub>**, jelikož nám **H<sub>U</sub>**-matice pro transformátor napětí a **H<sub>i</sub>**-matice pro transformátor proudu. **H<sub>k</sub>**- a **H<sub>N</sub>**-matice jsou nezajímavé pro

zaměření této práce ( $\mathbf{H}_k$ -matice pro kaskádní řazení transformátorů za sebou a  $\mathbf{H}_N$ -matice není realizovatelná).

Tab. 1: Přehled přenosových parametrů čtyřpólů

| Přenosový parametr                              | Značka       | Vztah k maticovým parametrům $z, y, h$ |             |           |           |             |          |
|---|--------------|--|-------------|-----------|-----------|-------------|----------|
|   |              | $z$                                    | $h_K$       | $h_I$     | $h_U$     | $h_N$       | $y$      |
| vstupní impedance při výstupu naprázdno         | $Z_{vst,0}$  | $z_{11}$                               |             |           |           |             |          |
| vstupní impedance při výstupu nakrátko          | $Z_{vst,K}$  |  |             | $h_{I11}$ |           |             |          |
| výstupní impedance při vstupu naprázdno         | $Z_{výst,0}$ | $z_{22}$                               |             |           |           |             |          |
| výstupní impedance při vstupu nakrátko          | $Z_{výst,K}$ |  |             |           | $h_{U22}$ |             |          |
| přenosová impedance naprázdno ( $\rightarrow$ ) | $Z_{21,0}$   | $z_{21}$                               | $1/h_{K21}$ |           |           |             |          |
| přenosová impedance naprázdno ( $\leftarrow$ )  | $Z_{12,0}$   | $z_{12}$                               |             |           |           | $1/h_{N21}$ |          |
| vstupní admitance při výstupu naprázdno         | $Y_{vst,0}$  |  |             |           | $h_{U11}$ |             |          |
| vstupní admitance při výstupu nakrátko          | $Y_{vst,K}$  |  |             |           |           |             | $y_{11}$ |
| výstupní admitance při vstupu naprázdno         | $Y_{výst,0}$ |  |             | $h_{I22}$ |           |             |          |
| výstupní admitance při vstupu nakrátko          | $Y_{výst,K}$ |  |             |           |           |             | $y_{22}$ |
| přenosová admitance nakrátko ( $\rightarrow$ )  | $Y_{21,0}$   |  | $1/h_{K12}$ |           |           |             | $y_{21}$ |
| přenosová admitance nakrátko ( $\leftarrow$ )   | $Y_{12,0}$   |  |             |           |           | $1/h_{N12}$ | $y_{12}$ |
| napěťový přenos naprázdno ( $\rightarrow$ )     | $K_{U,21,0}$ |  | $1/h_{K11}$ |           | $h_{U21}$ |             |          |
| napěťový přenos naprázdno ( $\leftarrow$ )      | $K_{U,12,0}$ |  |             | $h_{I12}$ |           | $1/h_{N11}$ |          |
| proudový přenos nakrátko ( $\rightarrow$ )      | $K_{I,21,K}$ |  | $1/h_{K22}$ | $h_{I21}$ |           |             |          |
| proudový přenos nakrátko ( $\leftarrow$ )       | $K_{I,12,K}$ |  |             |           | $h_{U12}$ | $1/h_{N22}$ |          |

## 2.2 Základní model transformátoru ve tvaru impedanční Z-matice



Obr. 4: Základní obvodový model transformátoru

Pro okamžité hodnoty lze **Z**-matici psát ve tvaru:

$$u_i(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - u_{i1}(t), \quad (8) \quad \text{nebo-li: } u_i(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M_i \frac{di_2(t)}{dt} \quad (9)$$

$$u_2(t) = u_{i2}(t) - L_2 \frac{di_2(t)}{dt}, \quad (10) \quad u_i(t) = L_i \frac{di_1(t)}{dt} - M_i \frac{di_2(t)}{dt} \quad (11)$$

## 2.3 Model transformátoru napětí ve tvaru hybridní HU-matice

Tímto modelem, s ohledem na technické využití transformátoru, je nejdůležitější pro chápání transformátoru jako „zdroj“ napětí viz obr. 4. Základní soustavu rovnic (10, 11), odpovídající **Z**-matici (1), je nutno upravit do tvaru **H<sub>U</sub>** matice (4). Matematický model transformátoru napětí pak získá tvar:

$$i_1(t) = i_{\mu 0} + \frac{1}{L_i} \int_0^T u_1(t) dt + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} i_2(t) \quad (12) \quad \text{nebo-li} \quad i_1(t) = i_{\mu 0}(t) + i'_2(t) \quad (13)$$

$$u_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_1(t) - L_2(1 - k^2) \frac{di_2(t)}{dt} \quad (14) \quad u_2(t) = u_{2,0}(t) - \Delta u_2(t) \quad (15)$$

kde převod transformátoru, tj. napěťový přenos naprázdno ( $\rightarrow$ ) a proudový přenos nakrátko ( $\leftarrow$ ) má velikost:

$$K_{U,21,0} = K_{I,21,K} = \frac{M}{L_1} = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (16)$$

Všimněme si, že  $\mathbf{H}_U$ -matice (5) je symetrická podle hlavní diagonály. Význam veličin v rovnicích (13, 14, 15) matematického modelu je následující:

$$i_\mu(t) = i_{\mu 0} + \frac{1}{L_1} \int_0^T u_1(t) dt \quad (17) \quad \text{magnetizační „tokotvorný“ primární proud}$$

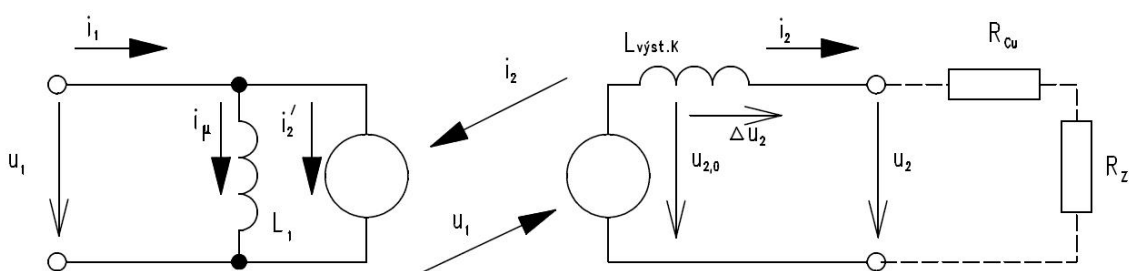
$$i'_2 = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} i_2(t) \quad (18) \quad \text{proud zátěže}$$

$$i_1(t) = i_{\mu 0}(t) + i'_2(t) \quad (19) \quad \text{celkový primární proud}$$

$$u_{s0}(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_1(t) \quad (20) \quad \text{výstupní napětí naprázdno}$$

$$L_{\text{výst},K} = L_{2,K} = (1 - k^2)L_2 \quad (21) \quad \text{výstupní indukčnost transformátoru, změřitelná při zkratovaných vstupních svorkách}$$

$$\Delta u_2(t) = (1 - k^2)L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (22) \quad \text{úbytek na výstupní indukčnosti}$$



Obr. 5: Obvodový model transformátoru napětí

## 2.4 Model transformátoru proudu ve tvaru hybridní **Hi**-matice

Tento model představuje chování transformátoru jako „zdroj“ proudu s indukčností viz. obr. 4.

Ze **Z**-matice (2) je nutno přetvořit na **Hi**-matici (4):

$$u_1(t) = L_1(1 - k^2) \frac{di_1(t)}{dt} + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_2(t) \quad (23)$$

neboli

$$u_1(t) = \Delta u_1(t) + u'_2(t) \quad (24)$$

$$i_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} i_1(t) - \left( I_{\mu 0} + \frac{1}{L_2} \int_0^T u_2(t) dt \right) \quad (25)$$

neboli

$$i_2(t) = i_{2,K}(t) - i_{\mu}(t) \quad (26)$$

kde převod transformátoru neboli proudový přenos nakrátko ( $\rightarrow$ ) a napět'ový přenos naprázdno ( $\leftarrow$ ), s ohledem na rovnici (22), bude:

$$K_{I,21,0} = K_{U,12,K} = \frac{M}{L_2} = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (27)$$

Všimněme si, že **Hi**-matice (24) je symetrická podle hlavní diagonály. Význam veličin v rovnicích (24), (26) matematického modelu je následující:

$$i_{\mu}(t) = I_{\mu 0} + \frac{1}{L_2} \int_0^t u_2(t) dt \quad (28) \quad \text{magnetizační „tokotvorný“ sekundární proud,}$$

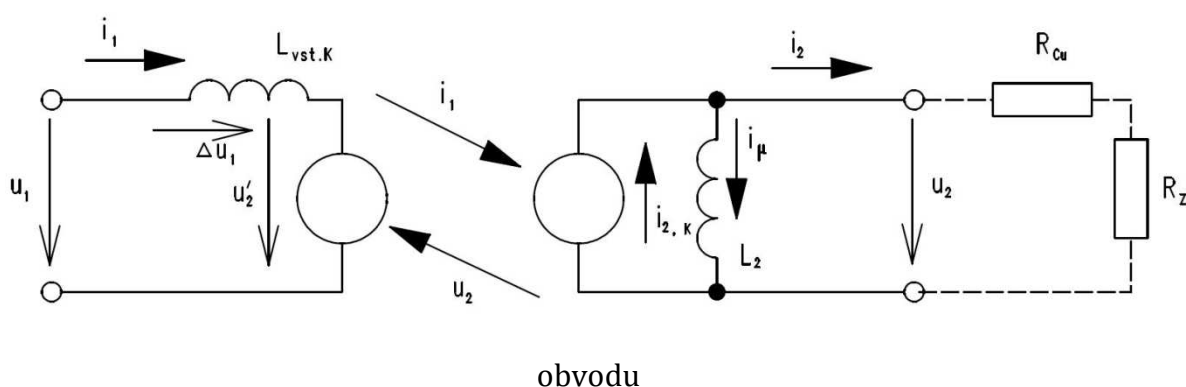
$$i_{2,K} = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} i_1(t) \quad (29) \quad \text{sekundární proud nakrátko, přepočtený pomocí primárního proudu,}$$

$$i_2(t) = i_{2,K}(t) - i_\mu(t) \quad (30) \quad \text{výstupný měřený proud, zatížený principiální neodstranitelnou chybou o velikosti } [-i_\mu(t)]$$

$$u_2'(t) = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} u_2(t) \quad (31) \quad \text{primární napětí přepočítané ze sekundáru na primár, vnucené do měřeného primárního obvodu}$$

$$L_{vst,K} = L_{1,K} = (1 - k^2)L_1 \quad (32) \quad \text{vstupní indukčnost transformátoru, vnesená do měřeného primárního obvodu}$$

$$\Delta u_1(t) = (1 - k^2)L_1 \frac{di_1(t)}{dt} \quad (33) \quad \text{úbytek na vstupní indukčnosti, vnesený do měřeného primárního}$$



Obr. 6: Obvodový model transformátoru proudu

## 3 Zkoušky

Transformátory a transformátorky podléhají normám ČSN EN 60076, *Výkonové transformátory, část 1: Všeobecné*, kde jsou popsány zvyklosti a zásady značení, výpočty, druhy zkoušek, apod.. a ČSN 35 1085, *Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem*.

### 3.1 Normy

Norma ČSN EN 60076 vydána roku 1997, zaměřená pro klasické transformátorky a transformátory běžné.

Rozsah platnosti:

- Jmenovité transformátory se jmenovitým výkonem menším než 1 kVA a trojfázové s menším než 5 kVA
- Přístrojové transformátory, zkušební transformátory, svařovací transformátory

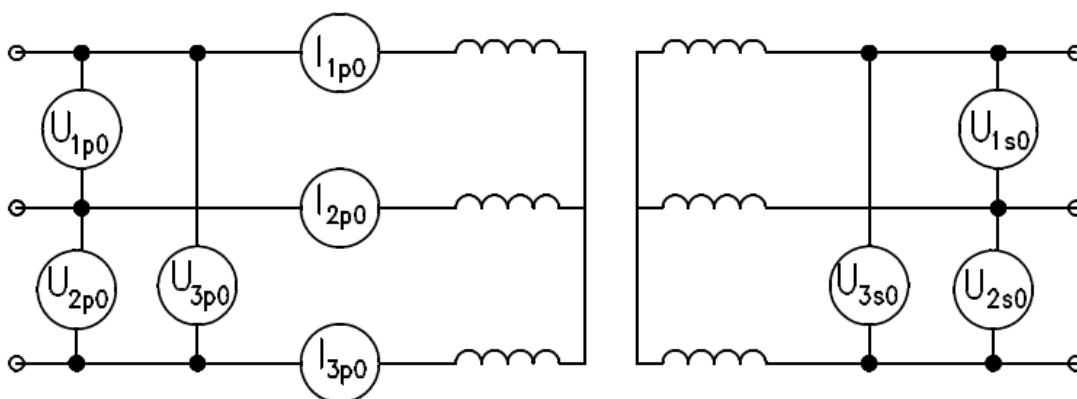
Norma ČSN 35 1086 byla vydána v roce 1978, pro výkonové transformátory (distribuční), rozsah platnost:

- Výkonové stacionární transformátory pro všeobec. použití včetně autotransformátorů, transformátorů pro vlastní spotřebu elektráren a pro kompletní transformační stanice trojfázové o výkonu 5 kVA a více a jednofázové o výkonu větším jak 1 kVA

## 3.2 Zkouška naprázdno

Zkouška naprázdno se provádí za účelem zisku dat o magnetickém obvodu transformátoru. Především určení ztrát naprázdno.

### 3.2.1 Podmínky měření



Obr. 7: Schéma zapojení naprázdno

**Všeobecné podmínky:** Při chodu transformátoru naprázdno napájíme vstupní vinutí střídavým napětím  $U_{1p0,2p0,3p0}$  s jmenovitou frekvencí  $f_n$ , při čemž výstupní vinutí je rozpojeno. Pro průběh primárních napětí  $U_{1p0,2p0,3p0}$  musí platit podmínka praktické sinusovky. Praktická sinusovka je pojem určující meze, kdy křivka se dá považovat za sinusovku. V našem případě musí být splnění maximálně 5% zkreslení (každý bod na křivce průběhu primárního napětí musí být max. odlišný o 5% amplitudy od odpovídající amplitudy sinu) a poměr efektivní a střední hodnoty primárního napětí se neliší více jak o 2% z 1,11 (viz. kap. 3.2.3). Na výstupu je při tom napětí  $U_{1s0,2s0,3s0}$ , které je totožné s vnitřním indukovaným napětím  $U_{i1,i2,i3}$ , neboť proud na výstupu je nulový.

Pro jednoduchý případ činnosti transformátoru, když sekundární cívka není připojena k zátěži a neodebírá se z ní výkon (chod naprázdno). Sekundární cívkou tedy neprochází proud a do primárního vinutí se zpětně neindukuje žádné napětí. Primární cívka je připojena ke zdroji elektromotorického napětí (v našem případě napětí sítě). Proměnný magnetizační proud  $I_{mag}$  v ní vyvolá proměnný magnetický indukční tok  $\Phi$ , v důsledku něhož se v cívce indukuje elektromotorické napětí  $u_m$ .



$$u_m = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (34)$$

Vstupem prochází proud  $I_{1p0,2p0,3p0}$ , který u normálních technických transformátorů bývá podle velikosti (0,015 až 0,17)  $I_n$ , kde  $I_n$  je jmenovitý zatěžovací proud. Vetší hodnoty  $I_{1p0,2p0,3p0}$  platí pro malé transformátory, menší pro velké. Vnitřní napětí  $U_{il}$  je o úbytky  $R_i \cdot I_{1p0,2p0,3p0}$  na činném odporu a  $X_{l\sigma} \cdot I_{10}$  na rozptylové reaktanci vstupního vinutí nižší než přiváděné napětí  $U_{1p0,2p0,3p0}$ .

Vektor proudu  $I_{1p0,2p0,3p0}$  svírá s vektorem vnitřního indukovaného napětí  $U_{il}$  úhel  $\varphi < \pi/2$ . Rozkladem na složky dostaneme jalovou neboli magnetizační složku  $I_{Fe}$  ve směru a smyslu  $U_{il}$ , odpovídá ztrátám v magnetickém obvodu  $\Delta P_{Fe}$ . Fázový posun naprázdno  $\varphi_{10}$ , tj. úhel  $I_{1p0,2p0,3p0}$  a  $U_{1p0,2p0,3p0}$  je menší než  $\pi/2$ , takže celkový příkon naprázdno pro jednu fázi  $P_{10} = U_{1p0} \cdot I_{1p0} \cdot \cos \varphi_{10}$  představuje celkové ztráty naprázdno  $\Delta P_{1p0}$ , které bývají (0,003 až 0,01)  $S_n$ , kde  $S_n$  je jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]. Ztráty naprázdno obsahují kromě ztrát v magnetickém obvodu nepatrné ztráty na vinutí  $\Delta P_{j0} = R I_{1,2,3}^2$  vstupní strany, ztráty v dielektriku izolace a eventuální ztráty ve stahovací konstrukci způsobené netočivými toky od „třecích vln“ (všechny vyšší harmonické) a magnetické nesouměrnosti. Protože úbytek při proudu naprázdno je velmi malý (0,0015 až 0,0024)  $U_n$ , lze ztráty ve vinutí při chodu naprázdno zanedbat, zvláště u velkých transformátorů.

### 3.2.2 Použité výpočty

Do programu byly zakomponovány následující výpočty:

Efektivní hodnota vstupního napětí  $U$  se spočte:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (35)$$

kde  $T$  je doba signálu  
 $u(t)$  je okamžitá hodnota primárního napětí v čase  $t$

Máme číselné hodnoty, tudíž nespojitou křivku a proto je nutno integrál nahradit součtem (obdélníková metoda), podmínka pro tento krok spočívá v dodržení velikosti  $N$ .  $N$  musí obsahovat tolik hodnot, aby bylo  $k$ -násobkem periody, kde perioda  $T$  obsahuje  $p$ -prvků v jedné periodě.

$$N \in k * T * p \quad (36)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad (37)$$

kde  $N$  je počet prvků v  $k$ -periodách  
 $u_n$  je okamžitá hodnota aktuálního vzorku  $n$

Obdobně se vypočítá efektivní hodnota proudu.

Převod transformátoru nejsnadněji získáme jako podíl primárního a sekundárního napětí

$$p_{1p0} = \frac{U_{1p0}}{U_{1p0}} \quad (38)$$

kde  $U_{1p0}$  je efektivní napětí naprázdno vstupní strany  
 $U_{1s0}$  je efektivní napětí naprázdno vstupní strany

Impedance naprázdno určíme jako podíl efektivních hodnot primárního napětí  $U_{1p0}$  a proudu  $I_{1p0}$ .

$$Z_{1p0} = \frac{U_{1p0}}{I_{1p0}} \quad (39)$$

kde  $I_{1p0}$  je efektivní proud naprázdno vstupní strany

Pro výpočet činného výkonu na jedné fázi  $P_{1p0}$  se integrál nahradí ekvivalentem pro nespojitý signál sumou. Pro dodržení správného výpočtu sumy je nutno splnit podmínku kdy  $N$  musí být takové, aby splňovalo podmínku (36).

$$P_{1p0} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{1p0}(t) u_{1p0}(t) dt, P_{1p0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{1p0n} u_{1p0n} \quad (40, 41)$$

kde  $i_{1p0}$  je okamžitá hodnota primárního proudu naprázdno  
 $u_{1p0}$  je okamžitá hodnota primárního napětí naprázdno

Zdánlivý výkon naprázdno na jedné fázi  $S_{1p0}$  se spočítá z efektivních hodnot napětí a proudu naprázdno v příslušné fázi

$$S_{1p0} = U_{1p0} \cdot I_{1p0} \quad (42)$$

Celkový činný výkon transformátoru naprázdno  $P_0$  je součet jednotlivých činných výkonů na vinutích transformátoru

$$P_0 = P_{1p0} + P_{2p0} + P_{3p0} \quad (43)$$

kde  $P_{1p0}$  činný výkon na 1. fázi vynutí naprázdno  
 $P_{2p0}$  činný výkon na 2. fázi vinutí naprázdno  
 $P_{3p0}$  činný výkon na 3. fázi vinutí naprázdno

Obdobně se zjišťuje celkový zdánlivý výkon transformátoru.

Jalový výkon naprázdno

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2} \quad (44)$$

Účinník nezjišťujeme z vzájemného zpoždění proudu na napětí, jelikož tato metoda nese s sebou velkou chybu. Výpočet realizujeme přes poměr činného výkonu  $P$  a

zdánlivého výkonu  $S$ , tato metoda je zatížena mnohem menší chybou než metodou přes průchody nulou.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{p0}}{S_{p0}} \quad (45)$$

Jednoduchým přepočtem získáme úhel posunutí mezi proudem a napětím primární strany transformátoru.

$$\varphi_0 = \arccos(\cos \varphi_0) \quad (46)$$

Z impedance naprázdno se zjistí odpor náhradního schématu představující ztráty v železe  $R_{Fe}$  (odpor, který musí být překonán pro natočení magnetických domén – magnetizaci jádra transformátoru).

$$R_{Fe} = Z_{p0} \cdot \cos \varphi_{10} = \frac{U_{p0}}{I_{p0} \cdot \cos \varphi_0} \quad (47)$$

Hlavní reaktance náhradního obvodu naprázdno charakterizuje reaktance  $X_{10}$

$$X_{p0} = \frac{U_{p0}}{I_{p0} \cdot \sin \varphi_0} \quad (48)$$

Hlavní Indukčnost primárního vinutí naprázdno

$$L_{p0} = \frac{X_{p0}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (49)$$

kde  $X_{p0}$  hlavní reaktance naprázdno  
 $f$  frekvence napájení

Indukční tok primárního vinutí  $\Phi_{1p0}$  a počáteční stav  $\Phi_0$

$$\Phi_{1p0}(t) = \int_0^T u_{1p0}(t) dt + \Phi_0(0) \quad (50)$$

$$\Phi_0(0) = \frac{\sup(\int_0^T u_{1p0}(t) dt) - \inf(\int_0^T u_{1p0}(t) dt)}{2} \quad (51)$$

kde  $\Phi_0$  integrační podmínka, za předpokladu že máme ustálený harmonická signál bez stejnosměrné složky.

---

Intenzita magnetického pole primární cívky  $H_{1p0}$ , za předpokladu homogenního magnetického pole

$$H_{1p0}(t) = \frac{N_1 \cdot i_{1p0}(t)}{l} \quad (52)$$

kde  $N_1$  počet závitů na vstupu primárního vnutí  
 $l$  střední délka siločáry

Magnetická indukce jádra transformátoru naprázdno

$$B_{1p0}(t) = \frac{N_1 \cdot \Phi_{1p0}(t)}{S} \quad (53)$$

kde  $S$  průřez jádra transformátoru  
 $\Phi_{1p0}$  intenzita magnetického pole primárního vnutí

### 3.2.3 Korekce

Při měření transformátorů se mohou vyskytovat určité druhy chyb, rušení či nedostatků způsobené místem měření např. distribuční sítě (napájení ze sítě, nedodržení kmitočtu, napětí...). Proto se provádí přesně dané přepočty, které částečně potlačí nedostatky.

Při měření naprázdno musíme zajistit napájecí napětí takové, aby mělo průběh prakticky sinusový a prakticky souměrné, Pokud tato podmínka není splněna, musí se provést korekce.

➤ Korekce na nesinusový tvar napájecího napětí

Napájecí napětí nastavíme tak, aby střední hodnota tohoto napětí byla rovna efektivní hodnotě jmenovitého napětí  $U_n$  udaného na štítku transformátoru dělená 1,11. A měříme proud naprázdno  $I'_{p0}$  a ztráty naprázdno  $P'_0$ .

$$U'_n = \frac{U_n}{1,11} \quad (54)$$

Poté se nastaví napájecí napětí na hodnotu jmenovitého napětí  $U_n$ . A měříme opět proud naprázdno  $I''_{p0}$ .

Přepočtem z naměřených hodnot určíme skutečné ztráty naprázdno  $P_0$  a proud naprázdno  $I_{p0}$

$$P_0 = \frac{P'_0}{p_1 + k \cdot p_2} \quad (55)$$

$$I_0 = \frac{I'_{p0} + I''_{p0}}{2} \quad (56)$$

|     |        |                                 |
|-----|--------|---------------------------------|
| kde | $p_1$  | poměrové ztráty hysterezí       |
|     | $p_2$  | poměrové ztráty vířivými proudy |
|     | $P'_0$ | naměřený činný výkon při $U'_n$ |
|     | $k$    | koeficient poměru napětí        |

---

$$k = \left( \frac{U_{p0}}{U_n} \right)^2 \quad (57)$$

*Pro hodnoty magnetické indukce  $B$  v magnetickém obvodu transformátoru se poměrové ztráty  $p_1$  a  $p_2$  určují dle speciálních tabulek (rozdělení dle druhu a použité techniky výroby).*

➤ Korekce při kmitočtu odlišného od jmenovitého

Nastane-li situace, kdy kmitočet  $f_0$  napájecího obvodu se liší od jmenovitého kmitočtu  $f_n$ , lze provést korekci. Avšak jen do meze  $\pm 3\%$  od jmenovité frekvence  $f_n$ .

$$U'_n = \frac{U_n}{f_n} \cdot f_0 \quad (58)$$

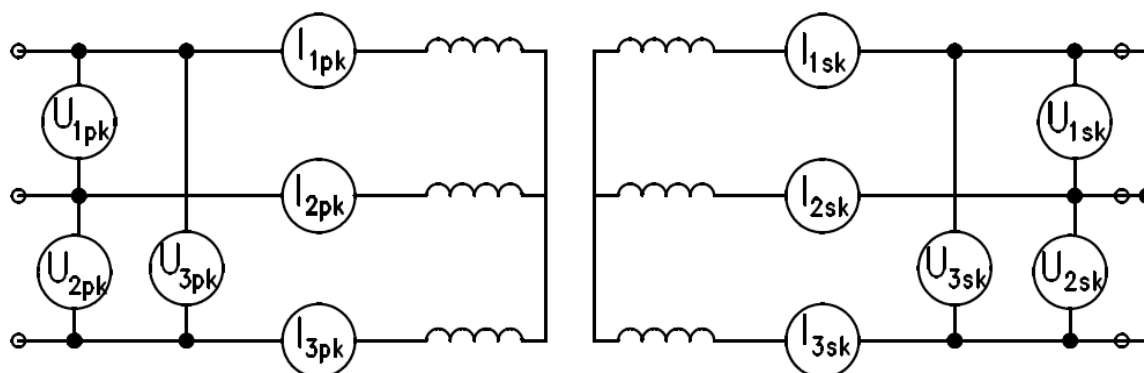
Ztráty naprázdno pro odlišný kmitočet se přepočte následovně

$$P_0 = \frac{P'_0}{p_1 \frac{f_0}{f_n} + k \cdot p_2 \left( \frac{f_0}{f_n} \right)^2} \quad (59)$$

### 3.3 Zkouška nakrátko

Zkouška nakrátko nám umožňuje určit ztráty „v mědi“. Především disipatibilní ztráty tvořené vlastním odporem ve vinutí, které je proměnné v závislosti na teplotě.

#### 3.3.1 Podmínky měření



Obr. 8: Schéma zapojení nakrátko

**Všeobecné podmínky:** Při chodu transformátoru nakrátko napájíme vstupní vinutí střídavým napětím  $U_{1pk,2pk,3pk}$ ,  $0,5 - 10\%$  jmenovitého napětí  $U_n$  s jmenovitým kmitočtem  $f_n$ , ze zásady 50 Hz, při čemž výstupní vinutí je spojeno (zkratováno). Na výstupu je při tom napětí  $U_{1sk,2sk,3sk} \cong 0$  V, které je totožné s vnitřním indukovaným napětím  $U_{i2}$ , neboť proud  $I_{1sk,2sk,3sk}$  je roven maximálnímu proudu.

Stav kdy se sekundární napětí rovná nule může nastat za předpokladů, že máme ideální prostředí, ideální transformátor apod.. V praxi pracujeme s neideálními transformátory a neideálním prostředím, proto se snažíme co nejvíce přiblížit ideálnímu stavu transformátoru. Např. U měření nakrátko sekundární strana transformátoru je zkratována, plíškem, drátem. Bohužel i tento nepatrný plíšek, drát, má svůj ohmický odpor a musíme jej zahrnout do výpočtů (70).

Stav nakrátko je pro transformátor náročný, z hlediska vysokých sekundárních proudů způsobené zkratem ( $Z \cong 0 \Omega$ ). Sekundární vinutí je velice namáháno a proto stav nakrátko by měl, pokud možno trvat jen malý okamžik, který je udán normou ČSN [10] či štítkovým údajem.



*Pozn. Při proudech vyšších jak 40% jmenovité hodnoty  $U_n$  se musí hodnoty odečíst do času  $t$ , která je definován v normě.*

$$t = \frac{480}{j_1 \cdot j_2} \quad (60)$$

kde  $j_1$  proudová hustota primárního vinutí  
 $j_2$  proudová hustota sekundárního vinutí

### 3.3.2 Použité vzorce

Procentní napětí nakrátko udává míru velikosti vstupního napětí na zkratovaném transformátoru, jímž protéká jmenovitý proud  $I_{IN}$ :

$$u_{1k} = \frac{U_{pk}}{U_n} \cdot 100\% \quad (61)$$

Převrácená hodnota procentního napětí nakrátko udává kolikrát větší je ustálený zkratový proud transformátoru (při napájení jmenovitým napětím) než jmenovitý.

$$i_{1K} = \frac{I_{1n}}{I_{pk}} 100\% \quad (62)$$

Impedance transformátoru nakrátko  $Z_K$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (63)$$

Zdánlivý, činný a jalový výkon nakrátko

$$S_{1kp} = U_{1kp} \cdot I_{1kp} \quad (64)$$

$$S_k = S_{1kp} + S_{2kp} + S_{3kp} \quad (65)$$

$$P_{1kp} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{1kp}(t) \cdot i_{1kp}(t) dt \quad (66)$$

$$P_k = P_{1kp} + P_{2kp} + P_{3kp} \quad (67)$$

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2} \quad (68)$$

Účinník z činného a zdánlivého výkonu

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} \quad (69)$$

Odpor zkratového vodiče na sekundárním vinutí

$$R_{zkrat} = \frac{U_{sk}}{I_{sk}} \quad (70)$$

Kompenzace ztrát ve vinutích, kde zahrnujeme odpor vodiče, kterým zkratujeme sekundární stranu transformátoru

$$R_{Cu} = \frac{U_k}{I_k} - R_{zkrat} \quad (71)$$

Reaktance nakrátko  $X_K$  z impedance nakrátko  $Z_K$ :

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_{Cu}^2} \quad (72)$$

Indukční tok nakrátko s kompenzací

$$\Phi_{1pk} = \frac{1}{N_1 \Delta t} \sum u_{1pk}(n) - R_{zkrat} i_{1sk}(n) \quad (73)$$

Dále z reaktance, lze dopočítat rozptylovou indukčnost  $L$ :

$$L_k = \frac{X_k}{2\pi \cdot f} \quad (74)$$

Intenzita magnetického pole

$$H_{1pk}(t) = \frac{N_1 \cdot i_{1pk}(t) - N_2 i_{1sk}(t)}{l} \quad (75)$$

kde  $i_{1pk}$  proud nakrátko na primárním vinutí transformátoru

$i_{1sk}$  proud nakrátko na sekundárním vinutí transformátoru

Magnetická indukce nakrátko

$$B_{1pk}(t) = \frac{N_1 \cdot \Phi_{1pk}(t)}{S} \quad (76)$$

### 3.3.3 Korekce

Přepočty a korekce pro neideální stav při provádění zkoušky nakrátko. Pro přepočty na referenční teploty, apod.

➤ Ztráty nakrátko a napětí nakrátko

$$P_k = P'_k \cdot \left( \frac{I_n}{I'} \right)^2 \quad (77)$$

$$u_k = \frac{U'_k \cdot I_{n2}}{U_n \cdot I'} \cdot 100 \quad (78)$$

Při měřeních ztrát nakrátko se musí tyto výkony převést na teplotu  $\theta$  pro teplotní třídy A, B, E na 75 °C, pro F, H, C na 115 °C.

Rozdíl ztrát  $P_{ak}$  bereme v případě, že přídatné ztráty způsobené oteplením vinutí, kdy teplota  $\vartheta$  je vyšší, než provozní teplota. Proto se ztráty převádí na referenční teplotu vinutí podle vztahu:

$$P_{ak} = P_k - \sum I^2 R \quad (79)$$

$$P_{a\theta} = P_{ak} \cdot \frac{1}{K} \quad (80)$$

$$\sum I^2_{1-3pk} R_{\theta} = \sum I^2_{1-3pk} R \cdot K \quad (81)$$

kde  $R_{\theta}$  odpor vinutí při teplotě  $\vartheta$   
 $K$  koeficient teplotního převodu  
 $P_{a\theta}$  přídatné ztráty

$$K = \frac{\theta + T}{\vartheta + T} \quad (82)$$

kde  $T$  teploty pro druh vinutí (měď  $T = 235$  °C, hliník = 225 °C)  
 $\theta$  referenční teplota pro měření nakrátko  
 $\vartheta$  teplota vinutí

Pro přepočet na ztráty nakrátko se používají tyto empirické vztahy.

$$P_{k\vartheta} = \sum I_{1-3k}^2 R_{\vartheta} + P_{a\vartheta} \quad (83)$$

Tento vztah platí pro podmínku

$$\frac{P_{a\vartheta}}{\sum I^2 R_{\vartheta}} \leq 0,1 \quad (84)$$

Pokud tato ztrátová podmínka není splněna, musí se provést převedení výkonu  $P_{k\vartheta}$  na referenční teplotu dle vzorce:

$$P_{k\vartheta} = P_k \cdot K \quad (85)$$

- Napětí nakrátko se také převádí na referenční teplotu vinutí. Napětí nakrátko  $u_{k\vartheta}$  odpovídající jmenovité teplotě se přepočte dle vztahu

$$u_{k\vartheta} = \sqrt{(u_{r\vartheta} \cdot K)^2 + u_{x\vartheta}^2} \quad (86)$$

kde  $u_{r\vartheta}$ . činná složka napětí nakrátko při teplotě  $\vartheta$   
 $u_{x\vartheta}$ . induktivní složka napětí nakrátko při teplotě  $\vartheta$   
 $\vartheta$  teplota vinutí

$$u_{r\vartheta} = \frac{P_k}{100 \cdot P_n} \quad (87)$$

$$u_{x\vartheta} = \sqrt{u_{k\vartheta}^2 - u_{r\vartheta}^2} \quad (88)$$

kde  $u_{k\vartheta}$ . činná složka napětí nakrátko

*Pokud činná složka napětí nakrátko  $u_{k\vartheta}$  je menší než 15% hodnoty napětí nakrátko  $u_{k\vartheta}$ , přepočet se neaplikuje.*

➤ Frekvenční podmínky při měření nakrátko

Kmitočet napájecího napětí musí splňovat  $\pm 3 \%$  od jmenovité hodnoty kmitočtu  $f_n$  udaného na transformátoru.

Napětí nakrátko při jmenovité frekvenci  $u_{fn} (\%)$  se spočítá z naměřené hodnoty napětí nakrátko a naměřené frekvenci  $f_k'$ .

$$u_{fn} = \sqrt{\left(u_x' \cdot \frac{f_n}{f_k'}\right)^2 + u_r'^2} \quad (89)$$

kde  $u_r$ . činná složka napětí nakrátko při kmitočtu  $f_k'$   
 $u_x$ . induktivní složka napětí nakrátko při kmitočtu  $f_k'$   
 $f_n$  jmenovitý kmitočet

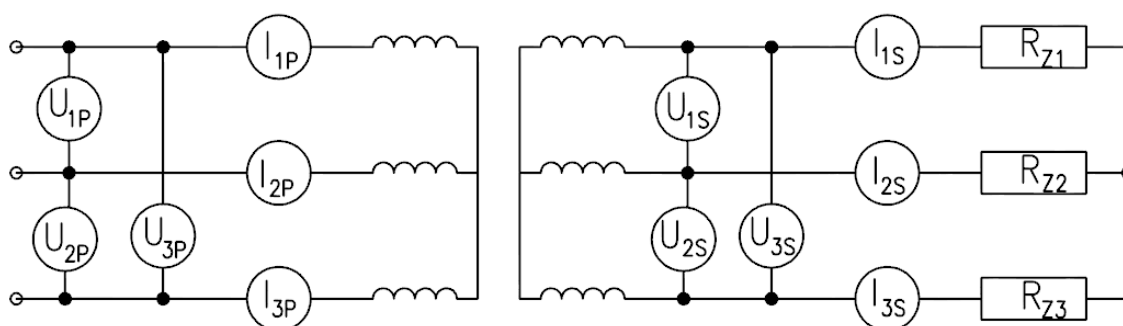
Je-li činná složka napětí nakrátko  $u_r$  nepřevyšuje 15% hodnoty napětí nakrátko  $u_{k0}$ , je možné převést napětí nakrátko na jmenovitý kmitočet.

$$u_{fn} = u_k \cdot \frac{f_n}{f'} \quad (90)$$

### 3.4 Zkouška zatěžovací

Při zatěžovací zkoušce zkoumáme především oteplení transformátoru. Transformátor napájíme jmenovitým napětím a proudem.

#### 3.4.1 Podmínky měření



Obr. 9: Schéma zapojení transformátoru se zátěží

**Všeobecné podmínky:** Při nejběžnějším zapojení transformátoru, zátěž, vstup napájíme střídavým jmenovitým napětím  $U_{1P,2P,3P}$  a sledujeme primární proudy, v sekundárním obvodu sledujeme napětí proud a teplotu vinutí  $\vartheta$ .

### 3.5 Vzorce pro parametry transformátoru

Pro naši úlohu jsme použily měřicí kartu NIDAQ 6212, která umožňuje zaznamenat hodnotu napětí a proudu se vzorkovací frekvencí  $f_s$ , z kterých lze snadno určit vzájemné posunutí (tj.  $\varphi$ ), činný a zdánlivý výkon.

Efektivní hodnota vstupního napětí  $U_{1,2,3}$  se spočte:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (91)$$

Máme číselné hodnoty, tudíž nespojitou křivku a proto je nutno integrál nahradit součtem (obdélníková metoda):

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad (92)$$

Efektivní hodnota vstupního proudu  $I_{1,2,3}$  se spočte:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}, \quad I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2} \quad (93, 94)$$

Celkový činný výkon dodávaný do transformátoru, podle předešlých poznatků:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) u(t) dt, \quad P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n u_n \quad (95, 96)$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (97)$$

Účinník nakrátko  $\cos \varphi$  obecně v 3f strojích:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (98)$$

## 3.6 Nejistoty měření

Každé měření obsahuje nejistoty měření, jelikož v praxi ideální součástky, ideální prostředí neexistuje, proto určujeme okolí naměřené veličiny, kde se může nacházet.

### 3.6.1 Měřicí karta

Chybu napětí udává přesnost napěťových vstupů měřicí karty

Tab. 2: Přehled specifikace karty pro výpočet nejistot pro rozsahy 0,2 – 10 V

| Rozsah        |                | Zbytková<br>chyba<br>zisku<br>[ppm z<br>hodnoty] | Vstupní<br>teplotní<br>chyba<br>[ppm/°C] | Referenční<br>teplotní<br>chyba | Zbytková<br>chyba z<br>rozsahu<br>[ppm z<br>rozsahu] | Teplotní<br>kompenzace<br>[ppm z<br>rozsahu/°C] | Chyba<br>diferenciální<br>nonlinearit<br>[ppm z<br>rozsahu] | Náhodné<br>rušení<br>[μVrms] | Absolutní<br>chyba na<br>plném<br>rozsahu<br>[μV] | Citlivost<br>[μV] |
|---------------|----------------|--|--|---------------------------------|--|---|---|------------------------------|---|-------------------|
| Kladný<br>[V] | Záporný<br>[V] |  |  |                                 |  |   |   |                              |   |                   |
| 10            | -10            | 75   | 7,3                                      | 5                               | 20   | 34  | 76  | 295                          | 2710  | 118,0             |
| 5             | -5             | 85   | 7,3                                      | 5                               | 20   | 36  | 76  | 149                          | 1420  | 59,6              |
| 1             | -1             | 95   | 7,3                                      | 5                               | 25   | 49  | 76  | 32                           | 310   | 12,8              |
| 0,2           | -0,2           | 135  | 7,3                                      | 5                               | 40   | 116   | 76  | 13                           | 89  | 5,2               |

**Absolutní Přesnost =**

$$\text{Hodnota. (Vstupní Chyba)} + \text{Hodnota. (Kompenzovaná chyba)} + \text{nejistota Rušením} \quad (99)$$

**Vstupní Chyba =**

$$\begin{aligned} & \text{Zbytková Vstupní Chyba} + \text{Vstupní Teplotní chyba. (Teplotní Změna z Posledního Vnitřního Zavolání)} + \\ & \text{Referenční Teplotní Chyba. (Teplotní Změna z Posledního vnějšího Zavolání)} \end{aligned} \quad (100)$$

$$\text{Chyba Offsetu} = \text{Zbytkový Offset} + \text{Teplotní offset}$$

$$\begin{aligned} & \text{(Teplotní Změna Posledního Vnějšího Zavolání)} + \text{Chyba Diferenciální Nonlinearity} \end{aligned} \quad (101)$$

$$\text{Nejistota Rušením} = \frac{\text{Náhodné Rušení} \cdot 3}{\sqrt{100}} \quad (102)$$

Program využívá převážně rozsah analogových vstupů  $\pm 5V$  a v případech přepnutí rozsahů  $\pm 2V$  (proudové snímače při měření nakrátko)-.

Příklad výpočtu nejistoty měření na rozsahu  $\pm 10V$ :

$$\text{Vstupní Chyba} = 75 \text{ ppm} + 7,3 \text{ ppm} \cdot 1 + 5 \text{ ppm} \cdot 10$$

$$\text{Kompenzovaná Chyba} = 20 \text{ ppm} + 34 \text{ ppm} \cdot 1 + 76 \text{ ppm}$$

$$\text{Nejistota Rušením} = \frac{295 \mu V \cdot 3}{\sqrt{100}}$$

$$\text{Vstupní Chyba} = 132,3 \text{ ppm}$$

$$\text{Kompenzovaná Chyba} = 130 \text{ ppm}$$

$$\text{Nejistota Rušením} = 88,5 \mu V$$



$$\text{AbsolutníPřesnost} = \text{Hodnota} * (\text{VstupníChyba}) + \text{Hodnota} * (\text{KompenzovanáChyba}) + \text{NejistotaRušením}$$

$$\text{AbsolutníPřesnost} = \text{Hodnota} * (262,3 \text{ ppm}) + 88,5 \mu\text{V}$$

Tab. 3: Přehled nejistot pro analogové vstupy měřicí karty NIDAQ 6212

| Rozsah [V] | Vstupní chyba [ppm] | Kompenzovaná chyba [ppm] | Nejistota rušením [μV] | Absolutní přesnost            |
|------------|---------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| ± 10       | 132,3               | 130                      | 88,50                  | Hodnota.(262,3 ppm) + 88,5 μV |
| ± 5        | 142,3               | 132                      | 44,70                  | Hodnota.(274,3 ppm) +44,7 μV  |
| ± 1        | 152,3               | 150                      | 9,60                   | Hodnota (302,3 ppm) + 9,6 μV  |
| ± 0,2      | 192,3               | 232                      | 5,70                   | Hodnota.(424,3 ppm) + 5,7 μV  |

### 3.6.2 Proudové sondy

- **HTP100S (Telcom)**
  - Proudový poměr 1000:1
  - Celková přesnost = 0.5% z jmenovité hodnoty proudu, 0,1% linearita % z jmenovité hodnoty proudu
  - $\delta_{iHTP100S} = 0,005 \cdot \text{Hodnoty} + 100 \text{ [mA]}$
- **HT200M. (Telcom)**
  - Proudový poměr 2000:1
  - Celková přesnost = 0.65% z jmenovité hodnoty proudu, 0,1% linearita % z jmenovité hodnoty proudu
  - $\delta_{iHT200M} = 0,0065 * \text{Hodnoty} + 200 \text{ [mA]}$

### 3.6.3 Výpočet nejistot

Přesnost měření proudů je dána přesností proudových sond a napěťových vstupů měřicí karty

$$\delta_i = \sqrt{\delta_{isondy}^2 + \delta_{ukarty}^2} \quad (103)$$

Výpočty efektivních hodnot jsou zatíženy chybou ze vzorkovaného signálu. Chyba efektivní hodnoty napětí je počítána

$$\Delta U_{ef} = \sigma u_{karty} + \frac{|\Delta u_A| \sum |u|}{\sum u^2} \quad (104)$$

Stejným vztahem je počítána chyba efektivní hodnoty proudu. Nejistoty činného výkonu je

$$\Delta P = \frac{1}{N} \sum |u| |\Delta i| + |i| |\Delta u| \quad (105)$$

Jednotlivé vzorky magnetického indukčního toku jsou zatíženou chybou a chyby dalších výsledků se počítají jako chyby nepřímých měření  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2} \quad (106)$$

Výpočty nepřímých měření je potřeba počítat s ohledem na to, že signál je vzorkovaný a každý vzorek má vlastní chybu. Např. intenzita magnetického pole  $H$  je počítána z nejistot jednotlivých proudů

$$\Delta H(k) = \sqrt{\left( \frac{\partial \left( \frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{l} \right)}{\partial i_1} \right)^2 \cdot \Delta i_1^2 + \left( \frac{\partial \left( \frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{l} \right)}{\partial i_2} \right)^2 \cdot \Delta i_2^2}$$

kde

$$\frac{\partial \left( -\frac{N_2 \cdot i_2}{l} \right)}{\partial i_1}, \frac{\partial \left( \frac{N_1 \cdot i_1}{l} \right)}{\partial i_2} = 0$$

$$\Delta H(k) = \sqrt{\left( \frac{N_1}{l} \right)^2 \cdot \Delta i_1^2 + \left( -\frac{N_2}{l} \right)^2 \cdot \Delta i_2^2}$$

$$\Delta H(k) = \sqrt{\frac{N_1^2}{l^2} \cdot \Delta i_1^2 + \frac{N_2^2}{l^2} \cdot \Delta i_2^2}$$

$$\Delta H(k) = \sqrt{\frac{N_1^2 \Delta i_1^2 + N_2^2 \Delta i_2^2}{l^2}} \quad (107)$$

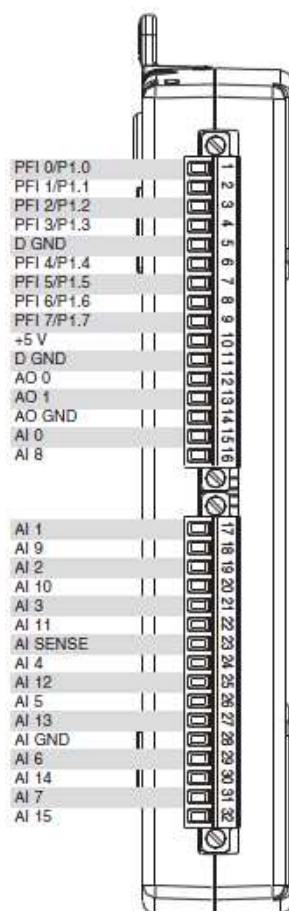
## 4 Hardware

### 4.1 Rozhraní a komunikace

Rozhraní realizováno vývojovým prostředím MATLAB. Komunikace je realizována dle specifikací výrobce měřicí karty NIDAQ 6212 (National Instrument), dále pak měřicí kartou, která se připojuje přes sběrnici USB, vhodná při připojení jiného počítače, obousměrnému provozu a velkou propustností (USB 2.0).

### 4.2 Měřicí karta NIDAQ

Měřicí karta NIDAQ 6212 je externí zařízení s analogovými/digitálními vstupy výstupy, které ovládáme pomocí programu MATLAB, přes sběrnici USB.



Obr. 10: Přehled pinů na měřicí kartě (AI/AO a IO)

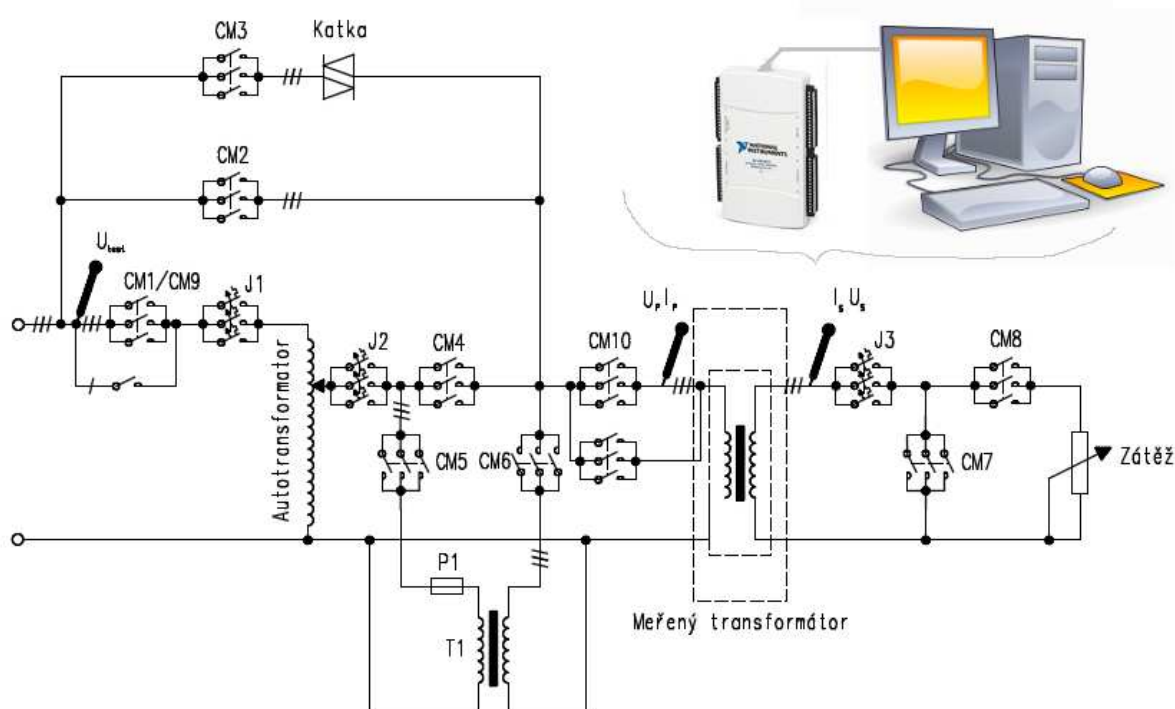


---

Pomocí MATLAB-u získáváme data z měřicí karty a zároveň ji využíváme jako akční člen pro spínání jednotlivých stykačů, dle blokového schéma (viz. obr.11).

## 4.3 Blokové schéma, uspořádání

Na obr. 11 je znázorněno blokové schéma trafo testeru. Principy jednotlivých zkoušek a měření je popsáno v kapitolách 3.



Obr. 11: Blokové schéma trafo testeru

Tab. 4: Přehled funkcí jednotlivých stykačů

| Stykač | Funkce   |
|--------|--|
| CM1    | přívod k autotransformátoru  |
| CM2    | přívod přímo na primární stranu pro 3f transformátoru                  |
| CM3    | přívod k tyristorovému modulu KATKA                                    |
| CM4    | výstup z autotransformátoru  |
| CM5    | přívod k snižujícím transformátorům, pro měření nakrátko               |
| CM6    | výstup k snižujícím transformátorům, pro měření nakrátko               |
| CM7    | zkratování sekundární strany transformátoru                            |
| CM8    | zatížení transformátoru  |
| CM9    | přívod přímo na primární stranu pro 1f transformátoru                  |
| CM10   | přepínání rozsahu proudových snímačů na primární straně transformátoru |

Tab. 5: Přehled sepnutých stykačů, podle druhu zkoušek

| Chod |           | Stykače |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|------|-----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|      |           | CM1     | CM2 | CM3 | CM4 | CM5 | CM6 | CM7 | CM8 | CM9 | CM10 |
| 1f   | Naprázdko | -       | -   | -   | X   | -   | -   | -   | -   | X   | X    |
|      | Nakrátko  | -       | -   | -   | -   | X   | X   | X   | -   | X   | X    |
|      | Zátěž     | -       | -   | -   | X   | -   | -   | -   | X   | X   | X    |
| 3f   | Naprázdko | X       | -   | -   | X   | -   | -   | -   | -   | -   | X    |
|      | Nakrátko  | X       | -   | -   | -   | X   | X   | X   | -   | -   | X    |
|      | Zátěž     | X       | -   | -   | X   | -   | -   | -   | X   | -   | X    |
|      | KATKA     | -       | -   | X   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -    |

Zdroj napájení, síť, je jištěna jističem D40.

Obvod je jištěn jističi:

- na primární straně před autotrafem C20A (J1 a J2)
- na sekundární straně B20A (J3)

Spínacími prvky jsou stykače

- 3RT1026-1BB40 24V DC – Siemens (CM10)
- 3RT1035-1BB40 24V DC – Siemens (CM1, CM2, CM3, CM4, CM8)
- 3RT1016-1BB41 24V DC – Siemens (CM5, CM6)
- LC1D50 24V DC (Siemens), CM7

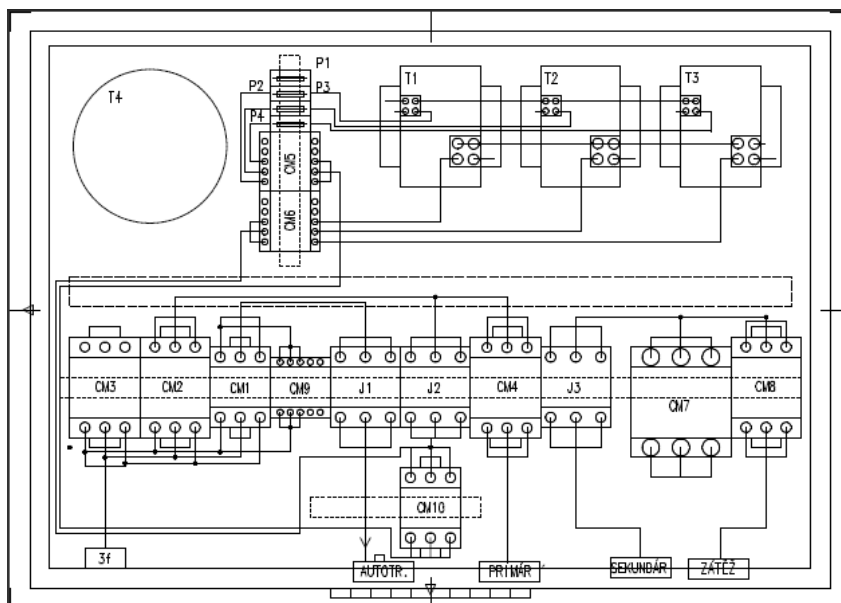
Proudové sondy (Hallův princip)

- HTP100S (Telcom) – pro sekundární proudy
- HT200M. (Telcom) – pro primární proudy

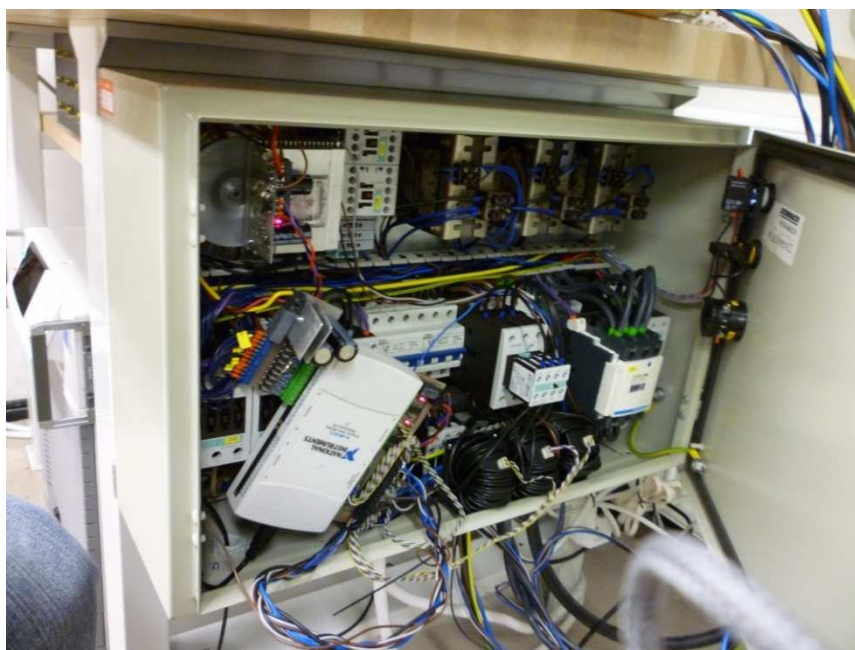
V primárním obvodu transformátoru je znázorněno 1f a 3f provoz, pro měření transformátorů jak 1f tak 3f, zajišťuje to stykač CM1 (3f) a CM9 (1f). Jištění zajišťujeme 3f jističem, pro oba druhy transformátorů.

Pro přehlednost v tab. 6. jsou vyznačeny jednotlivé stykače, sepnuté/rozepnuté, podle druhu měření.

Na dalším obrazovém příspěvku je rozložení jednotlivých hardwarových prvků v rozvodné skříni.



Obr. 12: Rozložení jednotlivých silových členů (Jx – jističe, CMxx – stykače, Px – pojistky, Tx - transformátory)



Obr. 13: Pohled na měřicí systém v reálu

---

## 5 Software

Programové vybavení a prostředí, kde měřicí a ovládací program vytvářel. Struktura jednotlivých celků, princip, ...

### 5.1 MATLAB

V automatizacích bývá problém vyhledat správný software, který by byl nejvhodnější, tzn. snadno modifikovatelný (v programové části), přehlednou obsluhou a dobrou spolehlivostí.

Pro splnění těchto nároků jsme zvolili MATLAB, který se v posledních letech prosadil v oblasti průmyslu a vzdělávání.

Co je to MATLAB?

MATLAB je numerické počítačové prostředí, pro tvorbu různých aplikací, obsahuje mnoho toolbox-ů, dále pak tbx, obsahující vždy jiný obor problematiky (Aerospace tbx., Bioinformatics tbx., Database tbx...) nejčastěji se MATLAB využívá pro počítání složitých numerických úloh, matematických modelů, najdeme jej i v průmyslu, kde se používá nejen na ovládání technologie, ale spíše pro modelové situace, kdy nás zajímá chování systému či produktu, předtím, než jej vytvoříme (mnohdy vyrobený model – fyzický, pro tyto účely je drahý).

Pro dosažení grafického prostředí byl využit nástroj GUIDE, obsažený v MATLABU pro tvorbu grafické reprezentace programu s interaktivními prvky (tlačítka, editovatelné pole, ..).

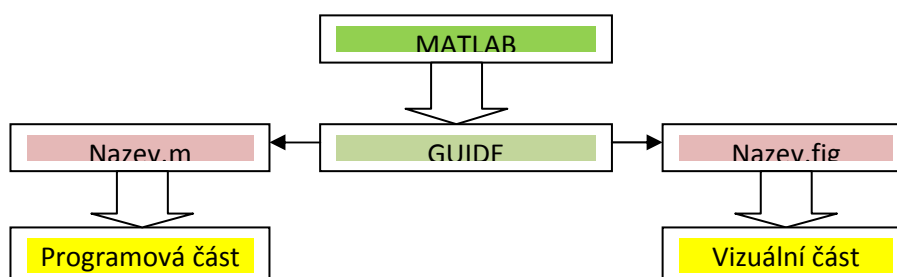
Vlastní program byl vytvořen pomocí implementovaného jazyku v MATLABU.



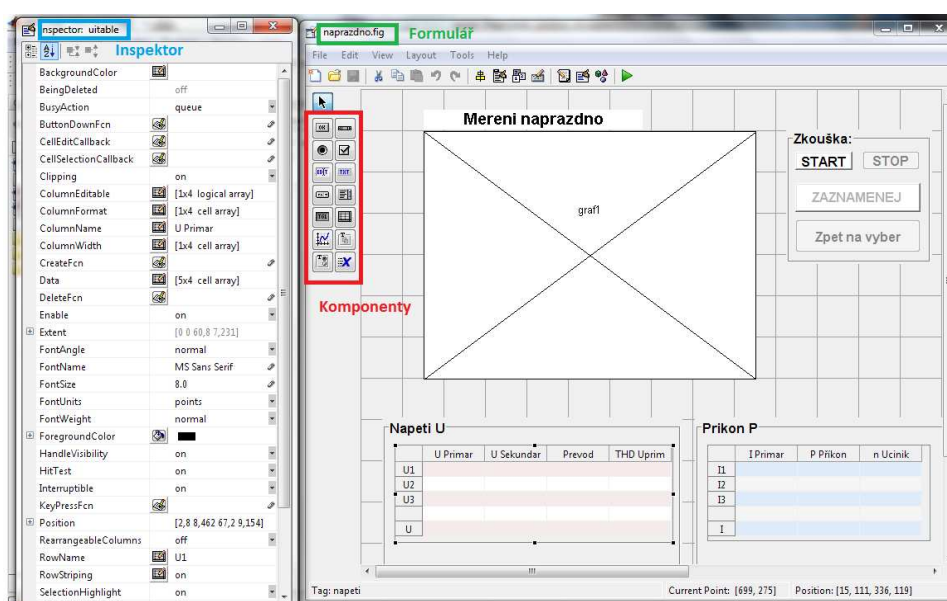
## 5.2 GUIDE

Programování v GUIDE v prostředí MATLAB je méně komplexní než v jazycích Delphi či C++. Jedná se o podobnou strukturu psaní příkazů, ale jak už bylo řečeno je to daleko méně obsáhlé na tvorbu komponent či přístupných objektů, které využíváte, až někdy poněkud strohé.

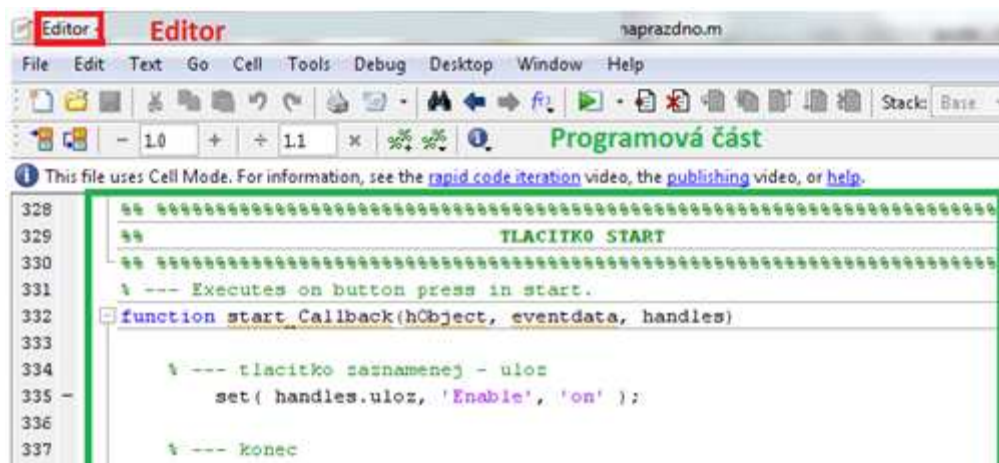
Při vytváření GUIDE – vizuální aplikace pod softwarem Matlab, se vám vytvoří formulář (figure), do kterého přidáváte jednotlivé komponenty (tlačítka, tabulky, panely, ...), které můžete následně upravit v inspektoru, jak vizuálně tak i programově (tzv. programové vlastnosti) viz Obr. 15..



Obr. 14: Vývojový diagram programování v GUIDE



Obr. 15: Prostředí pro vizualizaci programů - GUIDE

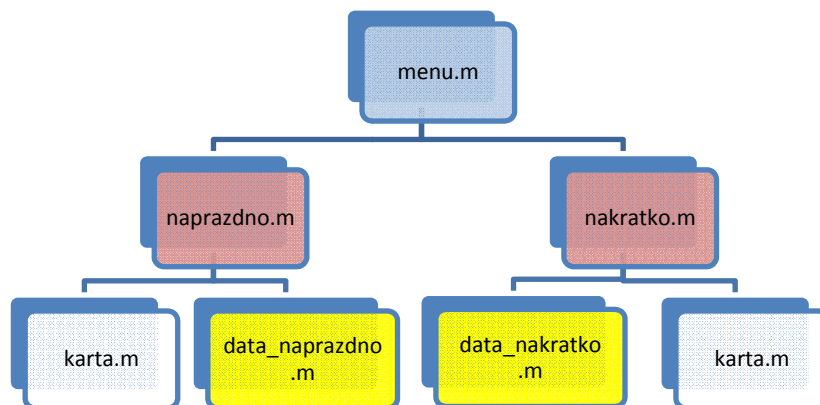


Obr. 16: Editor příkazů

Oba vytvořené soubory jsou propojeny a jeden ovlivňuje druhý, kruhová reference kde Nazev.fig je hlavní, starající se jen o viditelnou část uživatelem programu v hierarchii GUIDE. Nazev.m se stará o naprogramování a podružnou vizualizaci (enable, visible, ...).

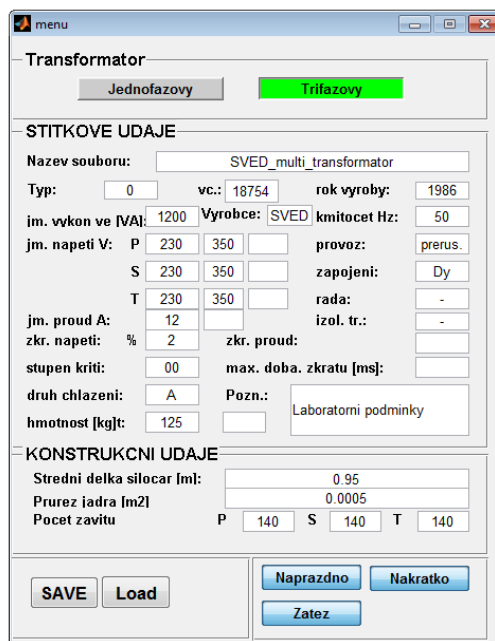
## 5.3 Programová výbava

Programová výbava, proč zrovna tento pojem. Nejedná se o jeden program, ale o hierarchickou strukturu.



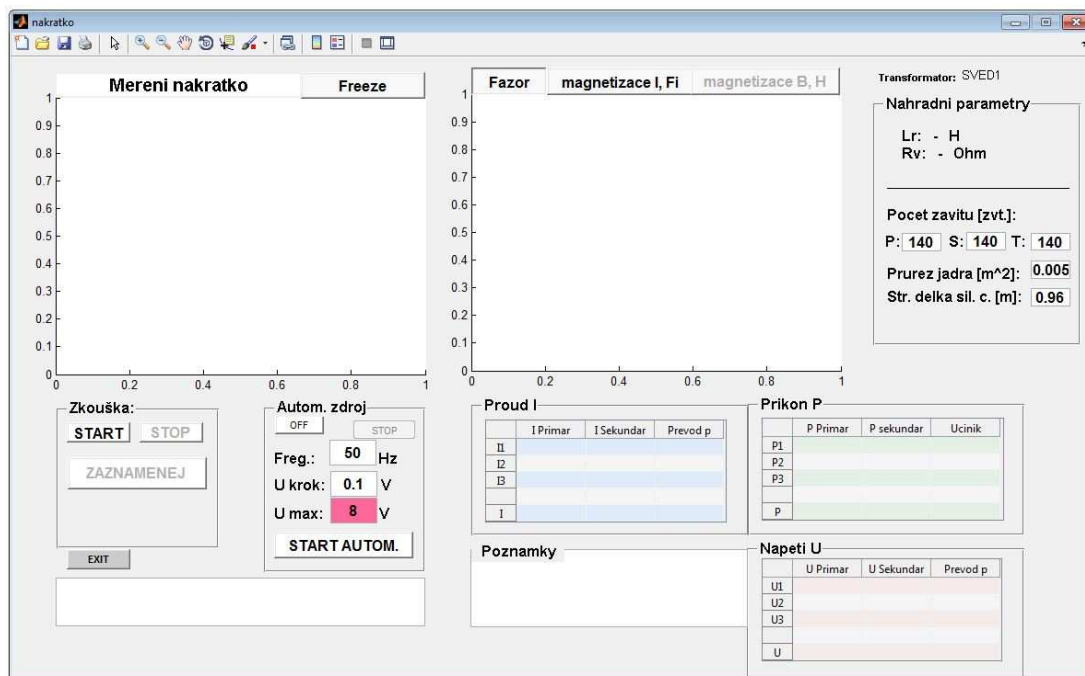
Obr. 17: Koncepte programu – hierarchická struktura

Hlavním spouštěcí program je *menu*, kde se zadávají parametry transformátoru, jedná se o šítkové údaje a konstrukční parametry.

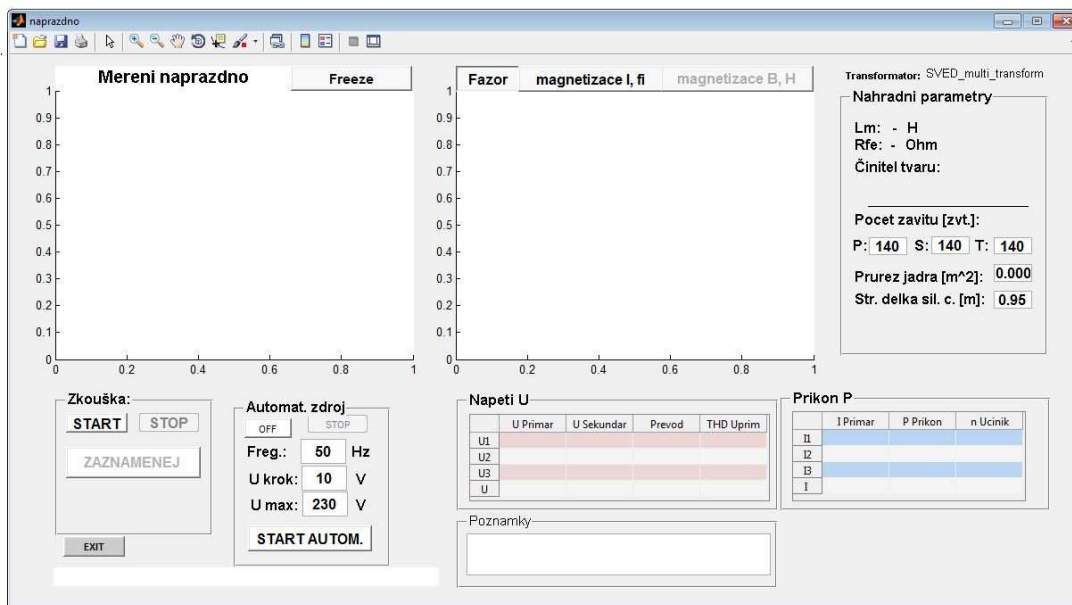


The screenshot shows a software window titled 'menu'. It contains two main sections: 'Transformator' and 'STITKOVE UDAJE' (Nameplate Data). The 'Transformator' section has two buttons: 'Jednofazovy' and 'Trifazovy', with 'Trifazovy' being active. The 'STITKOVE UDAJE' section contains various input fields for transformer parameters, including 'Název souboru', 'Typ', 'vc.', 'rok výroby', 'jm. výkon ve [VA]', 'Výrobce', 'kmitocet Hz', 'jm. napeti V', 'provoz', 'zapojeni', 'jm. proud A', 'rada', 'izr. tr.', 'zkr. napeti', 'zkr. proud', 'studen kriti', 'max. doba zkratu [ms]', 'druh chlazení', 'Pozn.', and 'hmotnost [kg]'. Below this is the 'KONSTRUKCNI UDAJE' (Construction Data) section with fields for 'Stredni delka silocar [m]', 'Prurez jadra [m2]', and 'Pocet zavitu'. At the bottom, there are buttons for 'SAVE', 'Load', 'Naprazdno', 'Nakratko', and 'Zatez'.

Obr. 18: Program pro zadávání a editaci transformátoru - *menu*

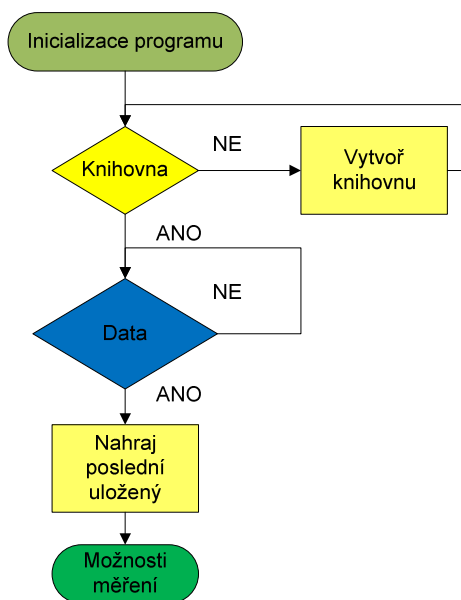


Obr. 19: Program nakrátko a jeho grafické zpracování

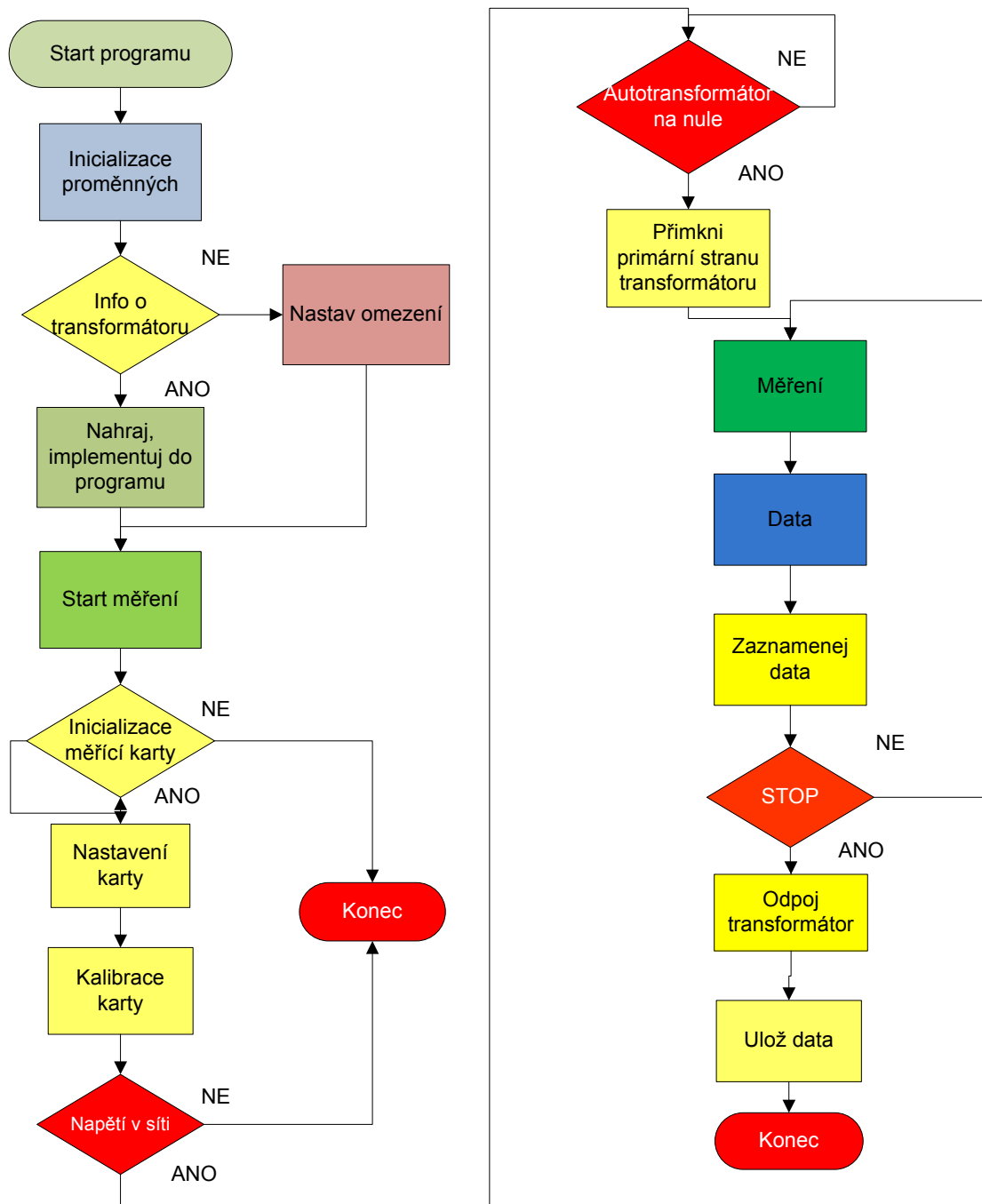


Obr. 20: Grafická stránka měření naprázdno

Struktura jednotlivých programových celků je principiálně znázorněna na blokových schématech viz. Obr. 21 a Obr. 22.



Obr. 21: Blokové schéma programu - *menu*



Obr. 22: Blokové schéma programu - měření

---

## 6 Obsluha pracoviště

Obsluha, jakož to uživatel použije pouze periferie počítače a zapínací tlačítko na měřicí stanici. Žádná manipulace se zařízením, zkušebním transformátorem není vyžadována.

### 6.1 Kontrola zařízení

Na prvním místě je potřeba zjistit zda je měřicí stanice připojena do sítě (klasický 5 kolíková 3f zásuvka). Dalším krokem je kontrola transformátoru zda je připojen správně po (tj. primár na primár, sekundár na sekundár). Pokud vše je v pořádku zapneme PC a spustíme MATLAB. Otevřeme si požadovaný adresář a spustíme program přes příkazový řádek, do kterého napíšeme *menu*.

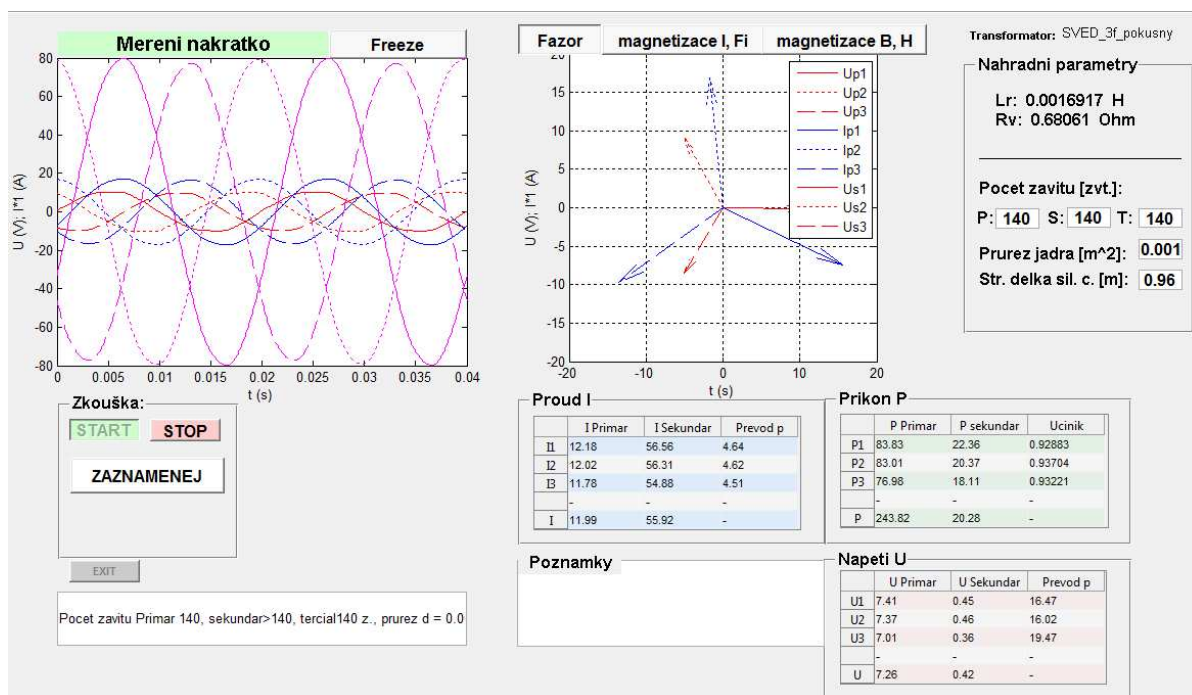
Vyplníte základní údaje o transformátoru (viz. Obr. 21: Blokové schéma programu - *menu*). A Přestoupíte k vlastnímu měření, dle nabídky programu, tj. Naprázdno, nakrátko či měření se zátěží.

**POZOR!** Z důvodů používání této stanice je umožněno měřit i bez udání hodnot. Měřicí systém pak slouží jako regulovaný zdroj napětí s možností monitorování napětí a proudů jak na vstupu tak na výstupu!

## 6.2 Vlastní měření

Zde se budeme zabírat popisem měření.

### 6.2.1 Struktura měřícího rozhraní



Obr. 23: Program v režimu měření nakrátko

Na Obr. 23. je vizuální reprezentace programu v měřícím režimu, resp. v měření nakrátko. Nejdůležitější ovládací částí programu jsou tlačítka *START*, *STOP* a *ZAZNAMENEJ*, slouží jak už jejich název napovídá k určitým operacím v programu.

**START**

- Inicializace karty, nastavení rozsahu, kontrola, měření

**STOP**

- Vypnutí napájení stykačů, uložení dat, příprava programu pro další použití

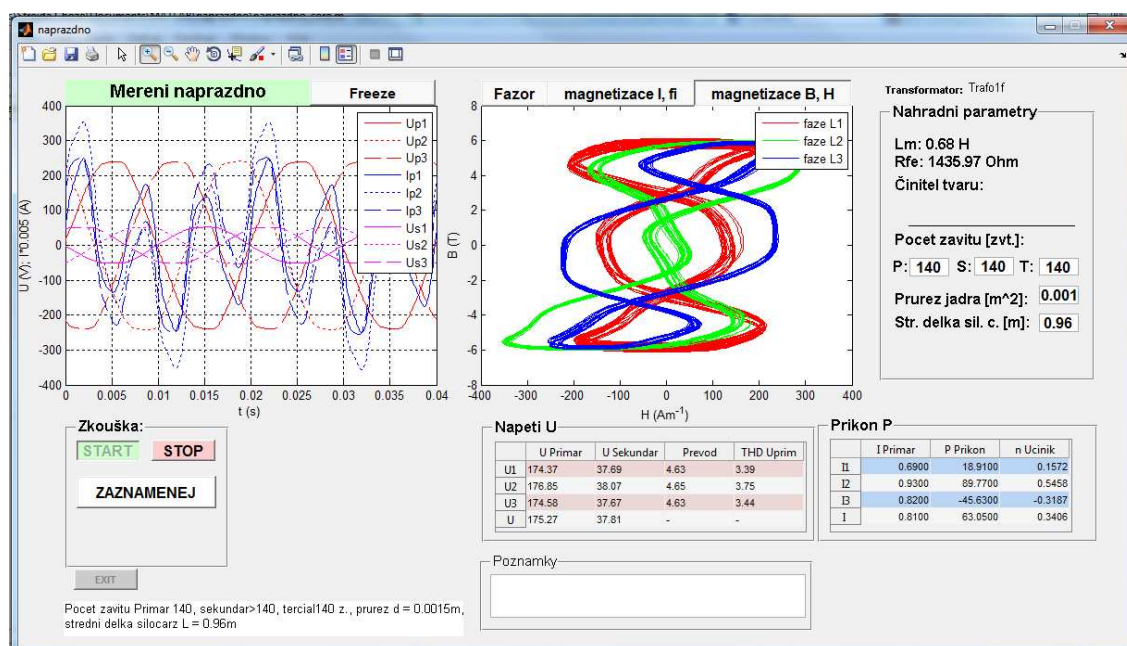
**ZAZNAMENEJ**

- Umožňuje ukládání tabulkových hodnot do strukturované tabulky, každé stisknutí je jeden řádek ve výsledném souboru.



Soubor s hodnotami nalezneme na disku C: v C:/dokumenty/trafotester/data.

Méně významná, přesto důležitá znaménka nalezneme nad oblastí druhého grafu tj. *Fazor, magnetizace I, Fi a magnetizace B, H*. Tyto tlačítka umožňují vykreslit magnetizační charakteristiky proudu  $I$  na indukční tok  $\phi$  a intenzitu magnetického pole  $H$  na indukci  $B$ .



Obr. 24: Program v režimu naprázdno

Na Obr. 24 vidíme ukázkou vykreslování  $B, H$  (viz. druhý graf na Obr. 24) diagramu vypovídající o magnetizaci transformátoru. Je zřejmé že transformátor pracuje naprázdno – zakřivení magnetizačních křivek a jejich protínání. Dále pak z průběhu proudů se dá odhalit jak je transformátor zapojen (určovací metody jsou dobře popsány v knize Transformátory, teoretické základy od Eugeniuse Jezierski).

## 6.3 Zpracování měření

Získaná data pomocí programu zpracujeme do přehledných tabulek a grafů..

## 6.4 Měření naprázdno

Při využití programu k ukládání dat přes tlačítko *Zaznamenej* se vygeneruje jako soubor pro Matlab (\*.m) tak i jako tabulku pro Excel (\*.xls). Výsledná tabulka vypadá následovně:

Tab. 6: Přehled napětí naprázdno

| $U_{1p0}$<br>[V] | $U_{2p0}$<br>[V] | $U_{3p0}$<br>[V] | $U_0$<br>[V] | $U_{1s0}$<br>[V] | $U_{2s0}$<br>[V] | $U_{3s0}$<br>[V] | $U_{s0}$<br>[V] |
|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 0,0              | 0,0              | 0,0              | 0,0          | 0                | 0                | 0                | 0               |
| 18,8             | 19,9             | 18,7             | 19,1         | 4,1              | 4,3              | 4,0              | 4,1             |
| 38,6             | 41,5             | 39,5             | 39,9         | 8,3              | 9,0              | 8,5              | 8,6             |
| <b>58,3</b>      | <b>59,3</b>      | <b>57,9</b>      | <b>58,5</b>  | <b>12,6</b>      | <b>12,8</b>      | <b>12,5</b>      | <b>12,6</b>     |
| 78,7             | 83,4             | 79,9             | 80,7         | 17,0             | 18,0             | 17,3             | 17,4            |
| 97,7             | 102,8            | 99,2             | 99,9         | 21,1             | 22,2             | 21,4             | 21,6            |
| 125,2            | 130,9            | 125,6            | 127,2        | 27,0             | 28,3             | 27,1             | 27,5            |
| 142,2            | 145,3            | 140,9            | 142,8        | 30,7             | 31,4             | 30,4             | 30,8            |
| 165,1            | 170,8            | 165,6            | 167,2        | 35,7             | 36,9             | 35,8             | 36,1            |
| 183,4            | 188,5            | 183,9            | 185,3        | 39,6             | 40,7             | 39,7             | 40,0            |
| 196,7            | 202,8            | 198,5            | 199,3        | 42,5             | 43,8             | 42,9             | 43,0            |
| 216,6            | 223,2            | 218,7            | 219,5        | 46,8             | 48,2             | 47,2             | 47,4            |
| 236,6            | 243,2            | 238,3            | 239,4        | 51,1             | 52,5             | 51,5             | 51,7            |

Tab. 7: Proudů naprázdno

| $I_{1p0}$<br>[A] | $I_{2p0}$<br>[A] | $I_{3p0}$<br>[A] | $I_0$<br>[A] |
|------------------|------------------|------------------|--------------|
| 0                | 0                | 0                | 0            |
| 0,4              | 0,4              | 0,4              | 0,4          |
| 0,6              | 0,6              | 0,5              | 0,6          |
| <b>0,8</b>       | <b>0,9</b>       | <b>0,8</b>       | <b>0,9</b>   |
| 0,9              | 0,9              | 0,8              | 0,9          |
| 1,0              | 1,1              | 0,9              | 1,0          |
| 1,2              | 1,3              | 1,1              | 1,2          |
| 1,1              | 1,1              | 1,0              | 1,1          |
| 1,3              | 1,5              | 1,3              | 1,3          |
| 1,3              | 1,5              | 1,3              | 1,4          |
| 1,3              | 1,7              | 1,4              | 1,5          |
| 1,4              | 1,9              | 1,6              | 1,6          |
| 1,4              | 2,1              | 1,7              | 1,8          |

Tab. 8: Přehled primárních výkonů naprázdno

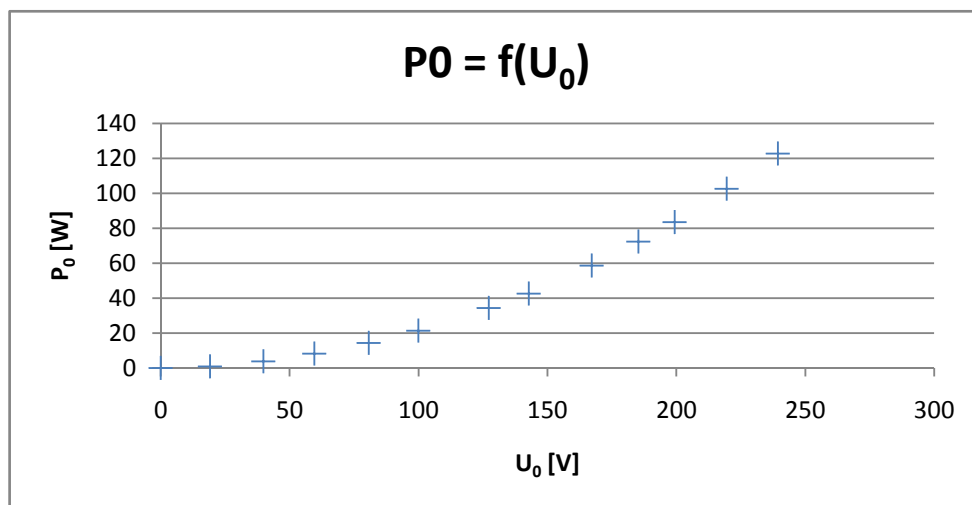
| P1<br>[W]  | P2<br>[W]   | P3<br>[W]    | P<br>[W]   | cos φ1<br>[-] | cos φ2<br>[-] | cos φ3<br>[-] | cos φ<br>[-] |
|------------|-------------|--------------|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 0          | 0           | 0            | 0          | 0             | 0             | 0             | 0            |
| 1,6        | 2,1         | -2,8         | 0,9        | 0,20          | 0,25          | -0,41         | 0,12         |
| 1,4        | 12,1        | -9,7         | 3,8        | 0,06          | 0,48          | -0,45         | 0,17         |
| <b>5,2</b> | <b>12,1</b> | <b>-10,4</b> | <b>6,9</b> | <b>0,19</b>   | <b>0,48</b>   | <b>-0,50</b>  | <b>0,17</b>  |
| 9,4        | 26,3        | -27,5        | 8,2        | 0,20          | 0,50          | -0,62         | 0,17         |
| 15,1       | 38,6        | -39,3        | 14,3       | 0,22          | 0,50          | -0,60         | 0,20         |
| 18,7       | 56,1        | -53,4        | 21,4       | 0,20          | 0,52          | -0,58         | 0,22         |
| 51,1       | 72,7        | -89,4        | 34,4       | 0,36          | 0,43          | -0,65         | 0,23         |
| 60,3       | 48,7        | -66,4        | 42,6       | 0,40          | 0,29          | -0,50         | 0,28         |
| 67,1       | 110,5       | -119,0       | 58,6       | 0,33          | 0,43          | -0,57         | 0,28         |
| 67,6       | 116,4       | -112,0       | 72,3       | 0,29          | 0,40          | -0,48         | 0,29         |
| 59,4       | 152,9       | -128,8       | 83,6       | 0,23          | 0,45          | -0,46         | 0,29         |
| 57,0       | 201,4       | -155,8       | 102,6      | 0,19          | 0,47          | -0,44         | 0,29         |
| 63,9       | 231,2       | -170,4       | 122,7      | 0,19          | 0,46          | -0,42         | 0,29         |

Pro tučně zvýrazněné hodnoty z měření naprázdno jsou nejistoty:

$$\begin{aligned}
 U_{1p0} &= (58.278 \pm 0.041) \text{ V}; & U_{1s0} &= (12.6023 \pm 0.009) \text{ V}; \\
 U_{2p0} &= (59.337 \pm 0.042) \text{ V}; & U_{2s0} &= (12.772 \pm 0.0091) \text{ V}; \\
 U_{3p0} &= (57.856 \pm 0.041) \text{ V}; & U_{3s0} &= (12.4819 \pm 0.0089) \text{ V}; \\
 U_0 &= (58.49 \pm 0.12) \text{ V}; & U_{s0} &= (12.619 \pm 0.027) \text{ V};
 \end{aligned}$$

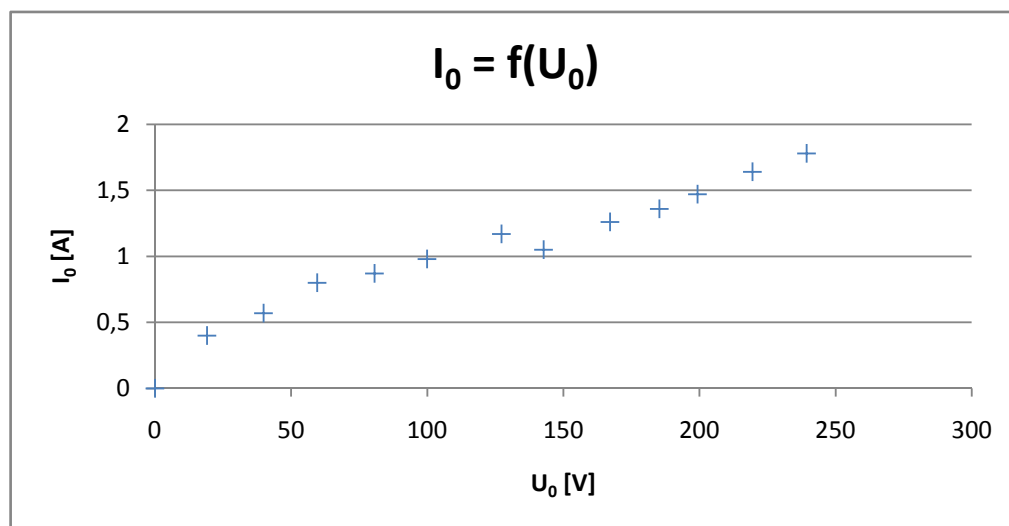
$$\begin{aligned}
 I_{1p0} &= (0.82 \pm 0.36) \text{ A}; & I_{1s0} &= (0.00352 \pm 0.10071) \text{ A}; \\
 I_{1p0} &= (0.93 \pm 0.46) \text{ A}; & I_{2s0} &= (0.00344 \pm 0.10069) \text{ A}; \\
 I_{1p0} &= (0.81 \pm 0.38) \text{ A}; & I_{3s0} &= (0.00332 \pm 0.10066) \text{ A}; \\
 I_0 &= (0.85 \pm 1,3) \text{ A}; & I_{s0} &= (0.0034 \pm 0.3024) \text{ A};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{10} &= (5 \pm 10) \text{ W}; & S_{10} &= (16 \pm 58) \text{ VA}; \\
 P_{20} &= (12 \pm 11) \text{ W}; & S_{20} &= (16 \pm 58) \text{ VA}; \\
 P_{30} &= (-10 \pm 10) \text{ W}; & S_{30} &= (16 \pm 58) \text{ VA}; \\
 P_0 &= (8 \pm 32) \text{ W}; & S_0 &= (53 \pm 84) \text{ VA};
 \end{aligned}$$



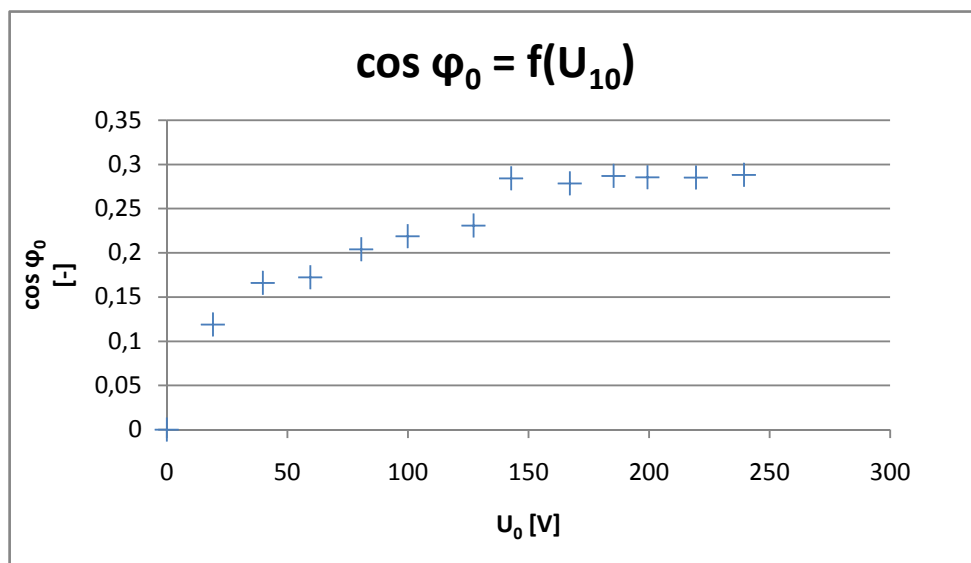
Obr. 25: Závislost činného výkonu na napětí naprázdno

Na obr. 26. vidíme exponenciální nárůst příkonu naprázdno při zvyšujícím se napětí.



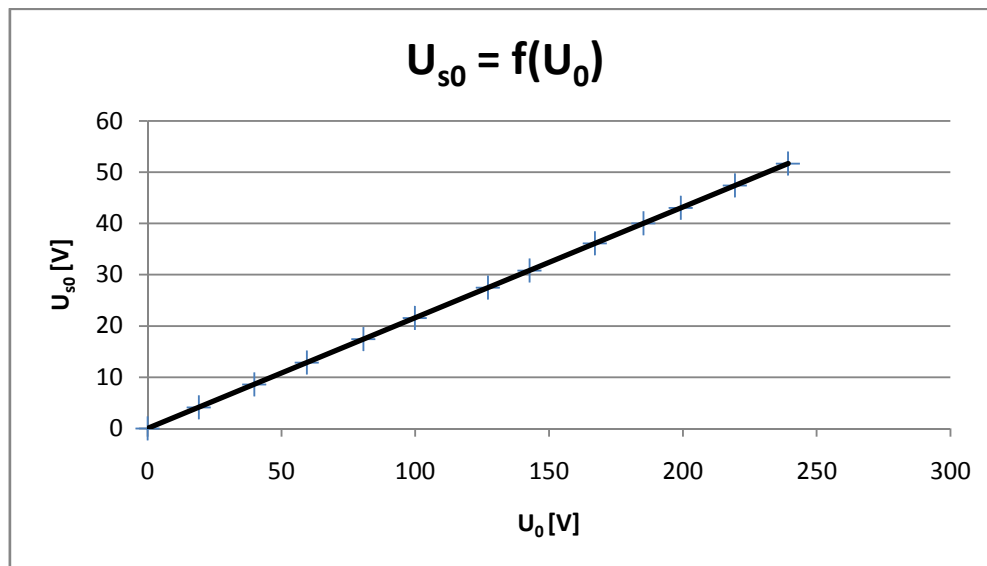
Obr. 26: Volt-ampérová charakteristika transformátoru naprázdno

Obr. 27 vypovídá o lineární závislosti napětí naprázdno a proudu naprázdno.



Obr. 27: Účinník naprázdno v závislosti na napětí naprázdno

Závislost na Obr. 27 vypovídá o ustálení účinníku naprázdno v mezích, kde jalový výkon je na maximální úrovni při chodu transformátoru.



Obr. 28: Vstupní a výstupní napětí naprázdno

Výstupní a výstupní napěťová charakteristika prozrazuje lineární závislost primární strany transformátoru na sekundární straně.

## 6.5 Měření nakrátko

Při využití programu k ukládání dat přes tlačítko *Zaznamenej* se vygeneruje jako soubor pro Matlab (\*.m) tak i jako tabulku pro Excel (\*.xls). Výsledná tabulka vypadá následovně:

Tab. 9: Tabulka jednotlivých napětí nakrátko

| $U_{1pk}$<br>[V] | $U_{2pk}$<br>[V] | $U_{3pk}$<br>[V] | $U_k$<br>[V] | $U_{1sk}$<br>[V] | $U_{2sk}$<br>[V] | $U_{3sk}$<br>[V] | $U_{sk}$<br>[V] |
|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 0,0              | 0,0              | 0,0              | 0,0          | 0,00             | 0,00             | 0,00             | 0,00            |
| 0,7              | 0,8              | 0,6              | 0,7          | 0,14             | 0,16             | 0,14             | 0,15            |
| 1,4              | 1,6              | 1,4              | 1,5          | 0,30             | 0,35             | 0,29             | 0,31            |
| 2,0              | 2,2              | 1,9              | 2,0          | 0,43             | 0,48             | 0,41             | 0,44            |
| 2,5              | 2,7              | 2,4              | 2,5          | 0,53             | 0,59             | 0,52             | 0,54            |
| 2,9              | 3,2              | 2,8              | 3,0          | 0,63             | 0,69             | 0,61             | 0,64            |
| 3,9              | 4,3              | 3,8              | 4,0          | 0,85             | 0,93             | 0,83             | 0,87            |
| 4,6              | 4,9              | 4,5              | 4,6          | 0,98             | 1,06             | 0,96             | 1,00            |
| 5,2              | 5,5              | 5,0              | 5,2          | 1,11             | 1,19             | 1,08             | 1,13            |
| 5,8              | 6,2              | 5,7              | 5,9          | 1,26             | 1,34             | 1,22             | 1,27            |
| <b>6,33</b>      | <b>6,29</b>      | <b>6,25</b>      | <b>6,27</b>  | <b>0,41</b>      | <b>0,43</b>      | <b>0,32</b>      | <b>0,39</b>     |
| 7,1              | 7,4              | 6,8              | 7,1          | 1,53             | 1,60             | 1,47             | 1,53            |
| 7,4              | 7,8              | 7,2              | 7,5          | 1,61             | 1,68             | 1,55             | 1,61            |
| 7,9              | 8,3              | 7,7              | 8,0          | 1,71             | 1,78             | 1,65             | 1,72            |
| 8,4              | 8,7              | 8,1              | 8,4          | 1,81             | 1,88             | 1,75             | 1,82            |

Tab. 10: Tabulka jednotlivých proudů nakrátko

| $I_{1pk}$<br>[A] | $I_{2pk}$<br>[A] | $I_{3pk}$<br>[A] | $I_{pk}$<br>[A] | $I_{1sk}$<br>[A] | $I_{2sk}$<br>[A] | $I_{3sk}$<br>[A] | $I_{sk}$<br>[A] |
|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 0,0              | 0,0              | 0,0              | 0,0             | 0,0              | 0,0              | 0,0              | 0,0             |
| 1,1              | 1,2              | 1,2              | 1,2             | 3,8              | 4,7              | 4,6              | 4,4             |
| 2,3              | 2,6              | 2,5              | 2,4             | 9,2              | 10,6             | 10,3             | 10,0            |
| 3,3              | 3,6              | 3,4              | 3,5             | 13,9             | 15,4             | 14,7             | 14,6            |
| 4,2              | 4,5              | 4,3              | 4,3             | 17,8             | 19,3             | 18,4             | 18,5            |
| 5,1              | 5,3              | 5,0              | 5,1             | 21,6             | 23,0             | 21,9             | 22,1            |
| 6,6              | 6,9              | 6,5              | 6,7             | 29,4             | 31,1             | 29,6             | 30,0            |
| 7,7              | 7,9              | 7,6              | 7,7             | 34,4             | 36,0             | 34,4             | 34,9            |
| 8,7              | 8,9              | 8,5              | 8,7             | 39,1             | 40,6             | 38,7             | 39,4            |
| 9,8              | 10,0             | 9,5              | 9,8             | 44,4             | 45,9             | 43,5             | 44,6            |
| <b>10,36</b>     | <b>10,27</b>     | <b>10,06</b>     | <b>10,23</b>    | <b>48,1</b>      | <b>48,46</b>     | <b>46,80</b>     | <b>48,17</b>    |
| 11,8             | 12,0             | 11,4             | 11,7            | 53,5             | 55,0             | 52,4             | 53,6            |
| 12,4             | 12,6             | 12,0             | 12,4            | 56,5             | 57,9             | 55,3             | 56,6            |

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 13,3 | 13,4 | 12,8 | 13,2 | 60,3 | 61,8 | 59,0 | 60,4 |
| 14,1 | 14,2 | 13,6 | 13,9 | 64,1 | 65,4 | 62,6 | 64,0 |

Tab. 11: Tabulka jednotlivých výkonů a účinností

| $P_{1k}$<br>[W] | $P_{2k}$<br>[W] | $P_{3k}$<br>[W] | $P_k$<br>[W] | $\cos \varphi_{1k}$<br>[-] | $\cos \varphi_{2k}$<br>[-] | $\cos \varphi_{3k}$<br>[-] | $\cos \varphi_k$<br>[-] |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0          | 0,00                       | 0,00                       | 0,00                       | 0,00                    |
| 0,6             | 0,7             | 0,7             | 1,9          | 0,81                       | 0,74                       | 0,86                       | 0,80                    |
| 2,8             | 3,4             | 3,0             | 9,3          | 0,89                       | 0,83                       | 0,91                       | 0,80                    |
| 5,9             | 6,9             | 6,0             | 18,7         | 0,89                       | 0,85                       | 0,91                       | 0,87                    |
| 9,3             | 10,5            | 9,3             | 29,1         | 0,90                       | 0,87                       | 0,92                       | 0,89                    |
| 13,3            | 14,9            | 12,9            | 41,1         | 0,90                       | 0,87                       | 0,92                       | 0,89                    |
| 23,2            | 26,1            | 22,9            | 72,2         | 0,90                       | 0,88                       | 0,92                       | 0,90                    |
| 31,4            | 34,7            | 30,7            | 96,8         | 0,90                       | 0,89                       | 0,91                       | 0,90                    |
| 40,2            | 43,8            | 38,5            | 122,5        | 0,90                       | 0,89                       | 0,91                       | 0,90                    |
| 51,5            | 55,7            | 49,2            | 156,4        | 0,90                       | 0,90                       | 0,91                       | 0,90                    |
| <b>60,9</b>     | <b>60,5</b>     | <b>56,4</b>     | <b>177,8</b> | <b>0,90</b>                | <b>0,90</b>                | <b>0,92</b>                | <b>0,90</b>             |
| 74,8            | 79,7            | 70,8            | 225,4        | 0,90                       | 0,90                       | 0,92                       | 0,90                    |
| 83,2            | 88,3            | 79,1            | 250,5        | 0,90                       | 0,90                       | 0,91                       | 0,91                    |
| 94,8            | 100,3           | 89,7            | 284,8        | 0,90                       | 0,90                       | 0,91                       | 0,91                    |
| 106,5           | 112,0           | 100,4           | 319,0        | 0,90                       | 0,91                       | 0,91                       | 0,91                    |

Pro tučně zvýrazněné hodnoty z měření nakrátko jsou nejistoty:

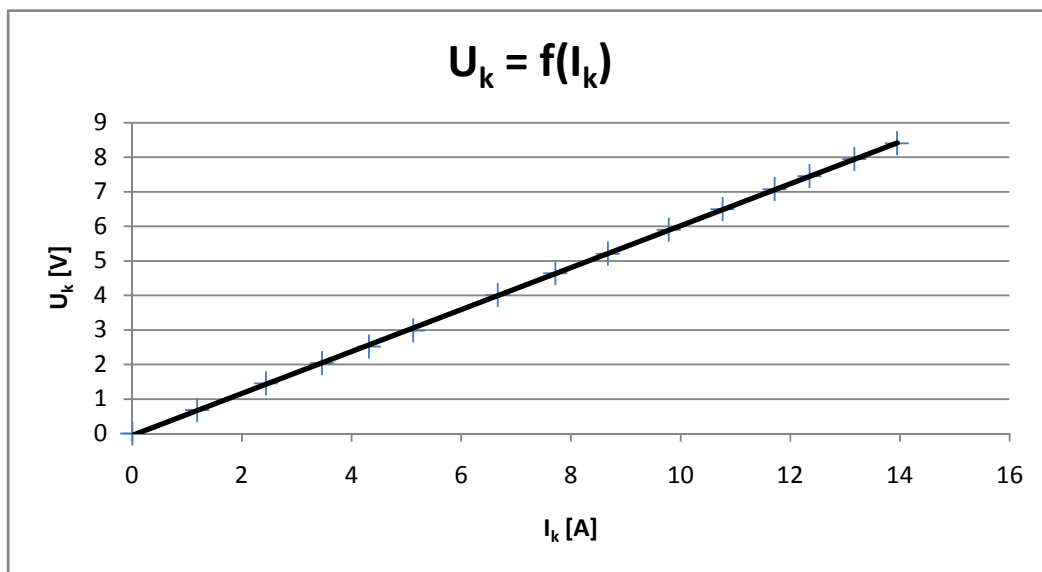
$$\begin{aligned} U_{1pk} &= (6.3247 \pm 0.0046) \text{ V}; & U_{1sk} &= (0.40196 \pm 0.0004) \text{ V}; \\ U_{2pk} &= (6.2893 \pm 0.0046) \text{ V}; & U_{2sk} &= (0.42937 \pm 0.00042) \text{ V}; \\ U_{3pk} &= (6.0154 \pm 0.0044) \text{ V}; & U_{3sk} &= (0.324 \pm 0.00035) \text{ V}; \\ U_k &= (6.21 \pm 0.014) \text{ V}; & U_{sk} &= (0.3851 \pm 0.0012) \text{ V}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{1pk} &= (10.36 \pm 0.25) \text{ A}; & I_{1sk} &= (48.1 \pm 9.6) \text{ A}; \\ I_{2pk} &= (10.27 \pm 0.24) \text{ A}; & I_{2sk} &= (48.1 \pm 9.6) \text{ A}; \\ I_{3pk} &= (10.06 \pm 0.24) \text{ A}; & I_{3sk} &= (46.8 \pm 9.4) \text{ A}; \\ I_k &= (10.23 \pm 0.73) \text{ A}; & I_{sk} &= (48 \pm 29) \text{ A}; \end{aligned}$$

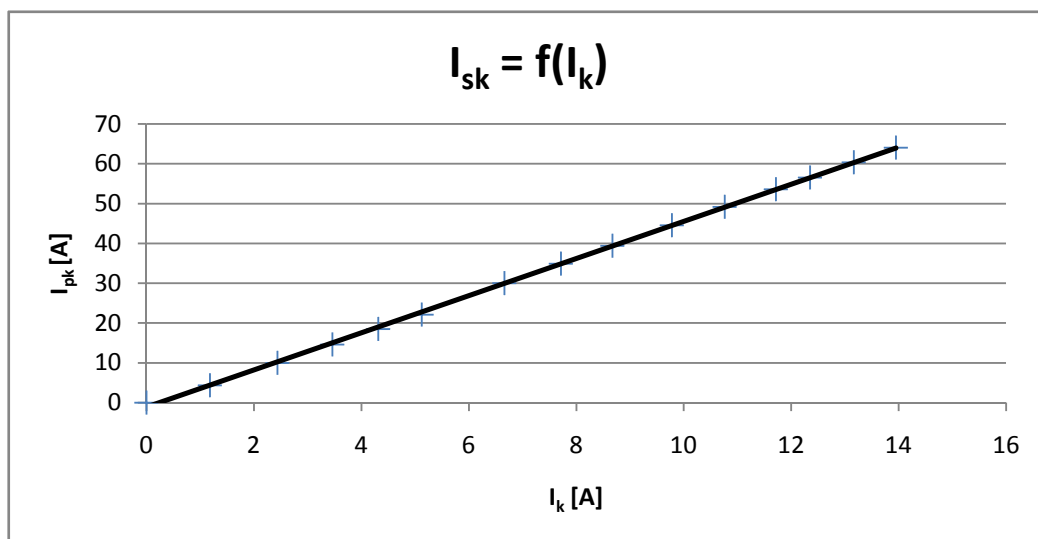
$$\begin{aligned} P_{1k} &= (60.9 \pm 1.2) \text{ W}; & S_{1k} &= (66 \pm 12) \text{ VA}; \\ P_{2k} &= (60.5 \pm 1.1) \text{ W}; & S_{2k} &= (66 \pm 12) \text{ VA}; \\ P_{3k} &= (56.4 \pm 1.1) \text{ W}; & S_{3k} &= (66 \pm 12) \text{ VA}; \end{aligned}$$

$$P_k = (177.8 \pm 3.4) \text{ W}; \quad S_k = (191 \pm 15) \text{ VA};$$

Na následujících obrazových příspěvcích nalezneme výsledné charakteristiky, určující transformátor.

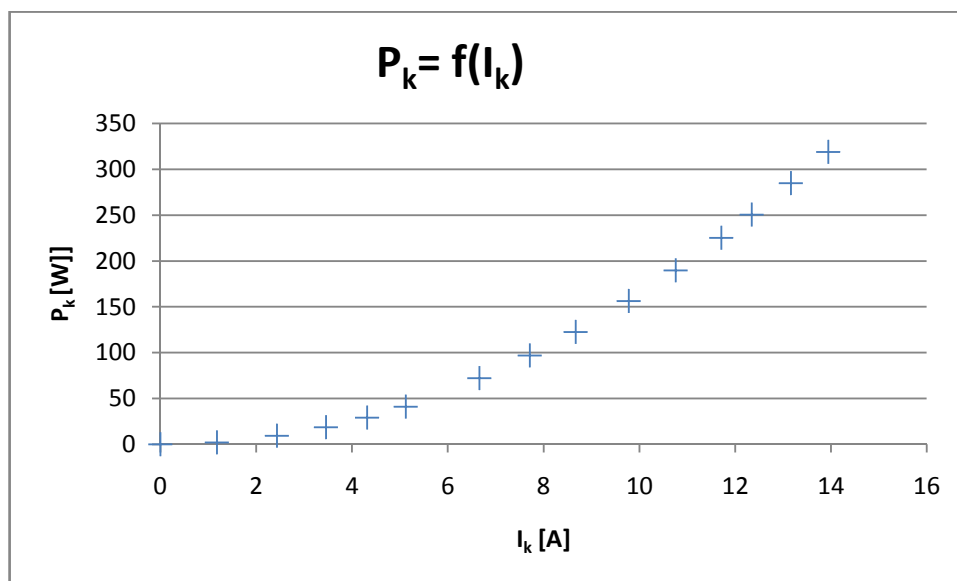


Obr. 29: Volt-ampérová charakteristika transformátoru v chodu nakrátko

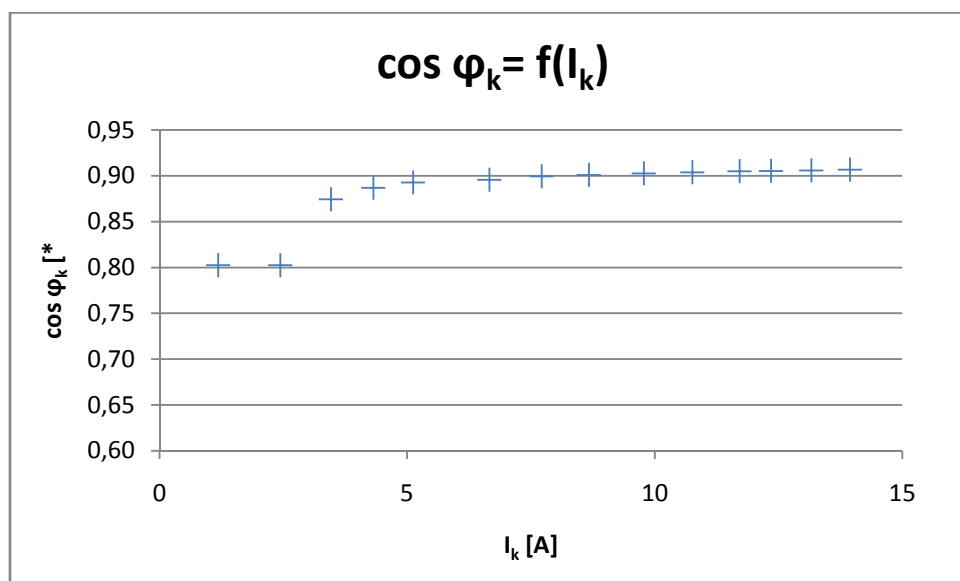


Obr. 30: Sekundární proud v závislosti na primárním proudu





Obr. 31: Vstupní charakteristika, závislost primárního výkonu na primárním proudu



Obr. 32: Účinník v závislosti na primárním proudu nakrátko

---

## 7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo teoreticky vysvětlit a popsat zkoušky transformátorů, vytvoření programu pro tyto zkušební postupy a zakomponovat jej do současného pracoviště, které nevyhovovalo potřebám školy. Hlavním podnětem bylo tedy vytvořit úlohu pro studenty se zaměřením na elektrotechniku, v rámci mnoha předmětů (Elektrotechnických výkonových členů, Elektrických obvodů, aj).

Analýzou problémů v dané tématice odhalil mnoho stěžejní, které se v průběhu tvorby programu řešily na základě studia norem ČSN, týkající se zkoušení transformátorů a jejich měření a odborné literatury. Pomocí těchto zdrojů byl vytvořen program, který umožňuje měření 3f transformátorů do 20 kVA.

Problémy detailního rozboru teoretické funkčnosti transformátoru ukázal, nepřesnosti ve více než 90% odborných knih a učebních textů. V náhradním obvodu transformátoru nejdou rozptylové indukčnosti spočítat, je to dáno počtem stupňů volnosti v systému náhradního obvodu.

Při návrhu programu a jeho implementaci do pracoviště se vyskytovalo mnoho nedostatků, převážně dlouhé odezvy, mezi jednotlivým nahráním dat do paměti PC. Tyto nedostatky jsou dány především počtem posílaných dat, přeci jenom měříme více jak 14 veličin v 3f režimu. Proto program musel být konstruován jako cyklicky se opakující rutina, s možností vnějšího zásahu obsluhy.

Jako ukázkou funkce programu byla provedena měření na nastavitelném transformátoru SVED, který posloužil jako ověření funkčnosti měřicí stanice a vytvořeného programu a rozhraní. Jednotlivé programy nejsou dokonalé, ale pro měření transformátorů a transformátorů je vhodný.

Celá bakalářská práce je jen prvním krokem k navržení plně automatického měřicího programu pro transformátory, je zde mnoho způsobů jak ho rozšířit a zdokonalit. Jeden z možných způsobů rozšíření je uzpůsobení programu pro měření 1f transformátorů.



## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| OBR. 1: NÁHRADA ČTYŘPÓLU ŠESTI IMPEDANCEMI (MŮSTKOVÝ ČLÁNEK JE EKIVALENTNÍ S KŘÍŽOVÝM ČLÁNKEM) .....                | 16 |
| OBR. 2: NÁHRADA TROJPÓLU $\Pi$ -ČLÁNKEM OBSAHUJÍCÍ TŘI IMPEDANCE. $\Pi$ -ČLÁNEK LZE.....                            | 16 |
| OBR. 3: TRANSFORMÁTOR JAKO DVOJBAN .....  | 17 |
| OBR. 4: ZÁKLADNÍ OBVODOVÝ MODEL TRANSFORMÁTORU .....  | 19 |
| OBR. 5: OBVODOVÝ MODEL TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....  | 20 |
| OBR. 6: OBVODOVÝ MODEL TRANSFORMÁTORU PROUDU .....  | 22 |
| OBR. 7: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPRÁZDNO .....   | 24 |
| OBR. 8: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAKRÁTKO .....  | 32 |
| OBR. 9: SCHÉMA ZAPOJENÍ TRANSFORMÁTORU SE ZÁTĚŽÍ.....   | 38 |
| OBR. 10: PŘEHLED PINŮ NA MĚŘÍCÍ KARTĚ (AI/AO A IO) .....  | 43 |
| OBR. 11: BLOKOVÉ SCHÉMA TRAFO TESTERU .....   | 45 |
| OBR. 12: ROZLOŽENÍ JEDNOTLIVÝCH SILOVÝCH ČLENŮ (JX – JISTIČE, CMXX – STYKAČE, PX – POJISTKY, TX – TRANSFORMÁTORY) . | 47 |
| OBR. 13: POHLED NA MĚŘÍCÍ SYSTÉM V REÁLU.....   | 47 |
| OBR. 14: VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMOVÁNÍ V GUIDE .....  | 49 |
| OBR. 15: PROSTŘEDÍ PRO VIZUALIZACI PROGRAMŮ - GUIDE.....  | 49 |
| OBR. 16: EDITOR PŘÍKAZŮ .....   | 50 |
| OBR. 17: KONCEPCE PROGRAMU – HIERARCHICKÁ STRUKTURA .....   | 51 |
| OBR. 18: PROGRAM PRO ZADÁVÁNÍ A EDITACI TRANSFORMÁTORU - MENU .....   | 51 |
| OBR. 19: PROGRAM NAKRÁTKO A JEHO GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....   | 52 |
| OBR. 20: GRAFICKÁ STRÁNKA MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....  | 52 |
| OBR. 21: BLOKOVÉ SCHÉMA PROGRAMU - MENU .....   | 53 |
| OBR. 22: BLOKOVÉ SCHÉMA PROGRAMU - MĚŘENÍ.....  | 54 |
| OBR. 23: PROGRAM V REŽIMU MĚŘENÍ NAKRÁTKO .....   | 56 |
| OBR. 24: PROGRAM V REŽIMU NAPRÁZDNO .....   | 57 |
| OBR. 25: ZÁVISLOST ČINNÉHO VÝKONU NA NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.....  | 60 |
| OBR. 26: VOLT-AMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO .....   | 60 |
| OBR. 27: ÚČINÍK NAPRÁZDNO V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.....   | 61 |
| OBR. 28: VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.....   | 61 |
| OBR. 29: VOLT-AMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA TRANSFORMÁTORU V CHODU NAKRÁTKO .....  | 64 |
| OBR. 30: SEKUNDÁRNÍ PROUD V ZÁVISLOSTI NA PRIMÁRNÍM PROUDU.....   | 64 |
| OBR. 31: VSTUPNÍ CHARAKTERISTIKA, ZÁVISLOST PRIMÁRNÍHO VÝKONU NA PRIMÁRNÍM PROUDU .....                             | 65 |
| OBR. 32: ÚČINÍK V ZÁVISLOSTI NA PRIMÁRNÍM PROUDU NAKRÁTKO.....  | 65 |



---

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| TAB. 1: PŘEHLED PŘENOSOVÝCH PARAMETRŮ ČTYŘPÓLŮ .....                               | 18 |
| TAB. 2: PŘEHLED SPECIFIKACE KARTY PRO VÝPOČET NEJISTOT PRO ROZSAHY 0,2 – 10 V..... | 40 |
| TAB. 3: PŘEHLED NEJISTOT PRO ANALOGOVÉ VSTUPY MĚŘÍCÍ KARTY NIDAQ 6212.....         | 41 |
| TAB. 4: PŘEHLED FUNKCÍ JEDNOTLIVÝCH STYKAČŮ.....                                   | 45 |
| TAB. 5: PŘEHLED SEPNUÝCH STYKAČŮ, PODLE DRUHU ZKOUŠEK .....                        | 46 |
| TAB. 6: PŘEHLED NAPĚTÍ NAPRÁZDNO .....   | 58 |
| TAB. 7: PROUDY NAPRÁZDNO .....   | 58 |
| TAB. 8: PŘEHLED PRIMÁRNÍCH VÝKONŮ NAPRÁZDNO.....                                   | 59 |
| TAB. 9: TABULKA JEDNOTLIVÝCH NAPĚTÍ NAKRÁTKO .....                                 | 62 |
| TAB. 10: TABULKA JEDNOTLIVÝCH PROUDŮ NAKRÁTKO .....                                | 62 |
| TAB. 11: TABULKA JEDNOTLIVÝCH VÝKONŮ A ÚČINÍKŮ .....                               | 63 |

---

## Seznam použité literatury

- [1] Doc. Ing. ČERMÁK, CSc, Tomáš ; Prof. Ing. KEPPERT, CSc, Svetozar. Elektrické stroje : I. Transformátory. II. Ostrava : Iediční středisko VŠB, 1984. 142 s., s. 4
- [2] PATOČKA, Miroslav. Několik poznámek k transformátoru. Brno : Symep, 2004. 28 s. Oborová práce. FEKT VUT Brno. s. 12
- [3] Ing. NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacích proudů. Liberec, 2003. 158 s. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] Ing. NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacích proudů. Přílohy k disertační práci Liberec, 2003. 95 s. Dizertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] VINKLÁNEK, David. Automatizované měření transformátorků. Liberec, 2006. 64 s. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci..
- [6] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 1 : Úvod - Transformátory*. I. Praha : Československá akademie věd, 1980. 388 s. 509-21-857.
- [7] PROF. INŽ. DR. BAŠTA, Jan, et al. *Měření na elektrických strojích : . Měření na transformátorech*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1959. 243 s.
- [8] Materiály [online]. 2006 [cit. 2011-05-09]. Jednofázový transformátor. Dostupné z WWW: [http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14ZSE/Mereni\\_trafa.pdf](http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14ZSE/Mereni_trafa.pdf)
- [9] ČSN EN 60076, Výkonové transformátory, část 1: Všeobecné



- 
- [10] ČSN 35 1085, Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem
- [11] *MATLAB : The Language of Technical Computing* [online]. VII. [Indie] : The MathWorks, 2005 [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <[http://www.serc.iisc.ernet.in/ComputingFacilities/software/matlab\\_prog.pdf](http://www.serc.iisc.ernet.in/ComputingFacilities/software/matlab_prog.pdf)>.
- [12] *Vasavi* [online]. 2006 [cit. 2011-05-18]. Automatic test equipment for Transformers. Dostupné z WWW: <<http://www.vasavi.com/cvct/datacvcts.htm>>.
- [13] Alibaba [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. Electronic Measuring Instruments. Dostupné z WWW: [http://www.alibaba.com/productgs/363328933/integrated\\_motor\\_and\\_transformer\\_test\\_equipment.html](http://www.alibaba.com/productgs/363328933/integrated_motor_and_transformer_test_equipment.html)
- [14] *lektric comopany* [online]. 2009 [cit. 2011-05-18]. TILT II Transformer Tester. Dostupné z WWW: <<http://www.hdelectriccompany.com/hd-electric-products/etm/transformer-testers/TILT-II.htm>>.
- [15] *TMVSS* [online]. 2010 [cit. 2011-05-18]. [Http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF/presne-mereni-prevodu.html](http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF/presne-mereni-prevodu.html). Dostupné z WWW: <<http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF/presne-mereni-prevodu.html>>.